

*Laboratório Regional de Engenharia Civil
Câmara Municipal do Funchal
Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira*

PROJECTO ISIS
Sistema Integrado para a Implementação de Sustentabilidade

**MODELAÇÃO DE ENERGIA
PARA TRÁFEGO URBANO**

Funchal, Dezembro de 1996

Programa LIFE, CE-DG XI
LIFE93/UK/A.1.5.3./UK/3109
LIFE94/UK/A151/UK/01702/MLTRG

Índice

1. Introdução	1
2. Objectivos	3
3. Metodologia	4
4. Caracterização da Área de Estudo.....	8
4.1. Rede Viária.....	8
4.1.1. Definição da Rede de Estudo	8
4.1.2. Comprimento das Ruas.....	9
4.1.3. Inclinação das Ruas	10
4.2. Parque Automóvel	11
4.2.1. Número de Veículos em Circulação	11
4.2.2. Idade Média dos Veículos	11
4.2.3. Classificação por Tipo de Energia.....	11
4.2.4. Classificação por Tipo de Utilização.....	12
5. Formulação de um Modelo de Energia.....	13
5.1. Princípios da Formulação	13
5.1.1. Influência da Velocidade Média.....	14
5.1.2. Influência da Inclinação Média	15
5.2. Factores Específicos de Energia.....	16
5.3. Formulação do Algoritmo	18
5.4. Exemplo de Formulação de um Algoritmo	20
6. Cálculo do Consumo de Energia	24
6.1. Implementação do Modelo	24
6.2. Circulação de Tráfego	24
6.2.1. Volumes de Tráfego	24
6.2.2. Velocidade Média	26
6.3. Análise dos Resultados.....	27
7. Outros Métodos.....	29
8. Caso de Estudo do Funchal	31
8.1. Introdução	31
8.2. Situação do Tráfego no Funchal.....	31
8.3. Consumo de Energia.....	32
8.4. Cálculo do Consumo de Energia	33

8.4.1. Condições de Tráfego no Funchal.....	34
8.4.2. Características da Rede Viária no Funchal.....	35
8.4.3. Implementação do Modelo de Energia.....	35
8.4.4. Resultados do Modelo de Energia.....	36
8.5. Conclusões do Caso de Estudo	40
Bibliografia.....	41
Equivalências de Unidades	42

1. Introdução

As crises mundiais do petróleo, que ocorreram desde 1973, fizeram os países industrializados reconhecer a fragilidade de um sistema energético excessivamente dependente dos produtos petrolíferos. O risco de uma ruptura energética, causada por razões políticas ou esgotamento das reservas existentes, levaram à necessidade de diversificar e reduzir a procura de energia primária de origem fóssil. Numa perspectiva de longo prazo, uma procura excessiva das fontes fósseis vai esgotar mais rapidamente as reservas energéticas acessíveis.

O desenvolvimento energético da União Europeia é cada vez mais influenciado por aquilo que se passa noutras partes do Mundo. O consumo de energia mundial está a crescer em média 2% ao ano, o que é duas vezes mais elevado do que a taxa comunitária. No entanto, nalgumas economias emergentes, a taxa de crescimento do consumo de energia é 6% ou superior.

Na União Europeia, é esperado um crescimento constante da procura de energia em cerca de 1% ao ano. A procura do sector industrial vai estabilizar enquanto o sector terciário e doméstico apresentará um ligeiro decréscimo. O sector dos transportes continuará a crescer e consequentemente consumirá mais energia, apesar das melhorias da eficiência. O crescimento da procura dos produtos petrolíferos está confinado ao sector dos transportes.

Nos últimos tempos, esta preocupação tem sido reforçada por um reconhecimento generalizado do efeito de estufa, bem como do impacte das emissões poluentes no ambiente natural e na saúde pública, resultantes de uma utilização insustentável da energia.

O crescimento da procura de energia vai aumentar a produção de CO₂ nas próximas décadas. Por sectores, o terciário e o doméstico são responsáveis por 22% das emissões de CO₂, a indústria 18%, electricidade 32% e transportes 28%. A tendência actual das emissões de CO₂ é incompatível com os compromissos internacionais da Comunidade, que é de alcançar, até o ano 2000, níveis de CO₂ iguais ou inferiores a 1990.

Como o sector dos transportes terrestres é baseado, do ponto de vista energético, nos derivados de petróleo, a estratégia comunitária está fortemente empenhada em reduzir os consumos de energia neste sector como um factor importante para atenuar a dependência do petróleo e os impactes associados na economia e no ambiente.

Por outro lado, a avaliação do consumo de energia relacionado com a circulação automóvel, comparando diferentes cenários de desenvolvimentos dos transportes, permite estimar os impactes micro e macroeconómicos de certas medidas para otimizar a mobilidade e melhorar a qualidade de vida, e é uma base para a conservação e gestão da energia.

A tomada de decisão está normalmente condicionada por razões orçamentais e, geralmente, é difícil avaliar o impacte económico das medidas para melhorar a qualidade ambiental. Por

isso, estas medidas podem ser vistas, em muitos casos, numa análise de curto prazo, como um investimento sem retorno.

Nesta perspectiva, a análise económica da gestão de tráfego é importante e pode ser determinante para a tomada de decisão. Se o impacto nos consumos de energia for tido em consideração, as medidas para reduzir o tráfego e melhorar a qualidade de vida em meio urbano podem também apresentar um interesse económico imediato.

2. Objectivos

O quinto programa comunitário, “Programa de Política e Acção em matéria de Ambiente e Desenvolvimento Sustentável”, refere que a internalização dos custos e benefícios externos pode ser o meio mais eficiente para integrar uma consciência ambiental, uma vez que assim funciona mais a favor das forças de mercado do que contra estas.

De acordo com o Livro Branco da Comissão Europeia “An Energy Policy for the European Union”, estudar acções específicas para o ambiente com uma análise custo-benefício é um instrumento essencial para implementar a estratégia de internalização de custos externos. Tal instrumento de avaliação vai proporcionar decisões ponderadas. Esta análise custo-benefício deverá integrar não só o efeito sobre as empresas mas também o impacto na política energética, tal como no balanço de combustíveis e abastecimento de energia.

Como a circulação de veículos em meio urbano causa custos externos consideráveis em termos ambientais e de qualidade de vida da população, é importante para a tomada de decisão ter instrumentos de análise para avaliar a situação. O consumo de energia é uma medida do impacto dos transportes, tal como outros indicadores, nomeadamente a qualidade do ar, ruído, segurança e mobilidade. O consumo de energia permite também avaliar a eficiência do sistema de transportes, através do cálculo de indicadores objectivos, tais como o consumo de energia por passageiro-km ou tonelada-km transportados.

No que diz respeito à internalização dos custos ambientais do sector dos transportes, a estrutura de preços da energia parece ser o meio mais apropriado para facturar a utilização do transporte privado, porque o consumo de energia é sensivelmente proporcional ao impacto causado no ambiente.

Este guia não pretende dar uma solução final única, mas essencialmente indicações aos técnicos de planeamento de tráfego e de energia para a análise dos consumos de energia no sector dos transportes e para a produção de indicadores de apoio à decisão. O conteúdo do guia compreende os procedimentos básicos para estimar o consumo de energia do tráfego em meio urbano e alguma informação teórica para compreender o seu comportamento em relação aos parâmetros mais relevantes, proporcionando aos técnicos os conhecimentos básicos para melhorar os seus cálculos em diferentes situações.

O guia pretende ser geral de modo a poder ser utilizado em diferentes cidades, para diferentes especificidades. O guia é também uma base teórica para adaptar e melhorar modelos de energia existentes, normalmente fornecidos como um módulo em modelos de tráfego.

3. Metodologia

Medir ou determinar com precisão os consumos de energia do sector dos transportes numa rede viária urbana é normalmente uma tarefa inviável, porque requer um enorme volume de trabalho para a recolha exaustiva de informação acerca da circulação de tráfego e dos consumos de energia de cada veículo.

No entanto, estimativas de consumo de energia baseadas em dados médios de tráfego e nas características técnicas de certas categorias de veículos podem ser, na maior parte dos casos, satisfatórias para calcular o consumo de energia e o impacto económico associado, e para comparar cenários alternativos para apoiar a decisão. Estas estimativas podem ser confrontadas com outras fontes de informação, tal como o abastecimento de combustíveis na região ou através de inquéritos especializados.

Para estes cálculos, os dados sobre os fluxos de tráfego podem ser obtidos a partir de contagens de tráfego ou de modelos de tráfego. Porém, a informação sobre os consumos específicos de energia para uma gama de veículos, divididos por categorias, é mais difícil de obter.

A determinação dos consumos específicos de energia podem ser realizados através da medição de consumos numa amostra representativa de diferentes veículos, sob determinadas condições de tráfego e considerando as características relevantes da rede viária.

No entanto, este procedimento pode ainda não ser viável, porque é muito especializado, necessitando de muita informação para definir o universo e uma amostra estatisticamente representativa, e isto é necessariamente longo e dispendioso. Se este procedimento não for realizável, podem ser encontradas alternativas, nomeadamente a utilização de modelos experimentais usados noutras cidades ou incluídos em *packages* de *software*, como os modelos de tráfego, que podem ser adaptados às características específicas da área de estudo.

Uma outra possibilidade é recolher informação técnica sobre os consumos de energia de veículos, dados pelos fabricantes e pela literatura especializada, tendo em conta as especificidades da rede viária e o comportamento médio do tráfego. Porém, é necessário ter em atenção a validade destes elementos para situações reais e verificar as condições e simplificações usadas para determinar os factores de energia.

Tendo o consumo específico de energia de uma dada categoria de veículos por unidade de comprimento e o número de veículos dessa categoria a atravessar uma secção duma rua, durante um determinado período de tempo, o consumo de energia correspondente por unidade de comprimento pode ser calculado para essa secção. Então, o consumo de energia dessa categoria pode ser calculado para um segmento de rua uniforme, se o comprimento é conhecido, como se apresenta de seguida:

$$E(i) = e(i) * N(i) * L$$

em que:

$E(i)$ - consumo de energia de cada categoria de veículos num segmento de rua, durante um determinado período de tempo

$e(i)$ - consumo específico de energia, por unidade de comprimento, por veículo de cada categoria

$N(i)$ - volumes de tráfego através de uma secção de rua, durante um período de tempo, para cada categoria de veículos

L - comprimento de um segmento de rua

i - índice para a categoria (ex: veículos ligeiros de passageiros; veículos Diesel ligeiros; autocarros; camiões)

O consumo de energia de todas as categorias de veículos no segmento de rua em análise é a soma:

$$E = \sum E(i)$$

em que:

E - consumo de energia num segmento de rua, durante um determinado período de tempo

Consequentemente, o consumo total de energia em todos os segmentos de rua incluídos na área de estudo é:

$$E_{total} = \sum E$$

em que:

E_{total} - consumo de energia total na área de estudo, durante um determinado período de tempo

As unidades podem ser as seguintes:

Energia..... : J, kJ, MJ, tep, kcal

Comprimento.. : m, km, milhas

Tempo..... : hora, dia, semana, ano

Os volumes de tráfego que atravessam uma secção podem ser obtidos através de contagens de tráfego ou utilizando um modelo de tráfego, se existir, para simular a situação pretendida. A utilização de um modelo vai permitir também a simulação de diferentes cenários e

estimar a influência nos volumes de tráfego resultantes de determinadas medidas preconizadas, para avaliar os impactes no consumo de energia, emissões, ruído, etc..

Tendo um algoritmo para o cálculo do consumo de energia e um modelo de tráfego que descreva aproximadamente o comportamento do tráfego, é possível simular cenários alternativos para estudar o impacte nos consumos de energia de diferentes medidas, para apoiar o planeamento e a tomada de decisão.

Esta metodologia é relativamente fácil de desenvolver e pode produzir elementos importantes para otimizar o planeamento de tráfego e apoiar a decisão, nomeadamente alguns indicadores práticos, tais como a distribuição modal dos consumos de energia por passageiro transportado, bem como diversos rácios baseados no impacte económico resultante da circulação automóvel na cidade.

Comparando com outros métodos de estudo dos consumos de energia para transportes em meio urbano, esta metodologia é baseada numa análise rua a rua e, por essa razão, tem a vantagem de ser consideravelmente flexível e pode ser incorporada num sistema integrado, ligado com um modelo de tráfego e outros cálculos, para simular diversos cenários possíveis.

Muitos modelos para o cálculo dos impactes ambientais causados pelo tráfego urbano, tais como a poluição atmosférica e o ruído, são baseados em fluxos de tráfego e têm em consideração as características particulares da rede viária e do parque automóvel. Assim, existem importantes sinergias em todos estes cálculos para serem incorporados num sistema integrado, ligados a um modelo de tráfego adequado.

Complementarmente, esse sistema integrado, incluindo o cálculo dos consumos de energia, pode basear-se num Sistema de Informação Geográfica, que vai permitir ao utilizador beneficiar das suas capacidades de relacionar várias categorias de informação e produzir indicadores úteis.

A fiabilidade dos resultados desta metodologia vai obviamente depender dos dados sobre as características físicas da rede viária e as características médias do parque automóvel. Não é praticável a verificação com medições no campo para confirmar a precisão dos resultados. Se forem realizados inquéritos ou medições, estes devem ser encarados mais para melhorar os factores específicos médios de consumo de energia do que para verificar os resultados. A determinação do grau de precisão dos resultados só é possível se os parâmetros estatísticos forem conhecidos para todos os dados recolhidos, bem como o erro intrínseco de todas as etapas do cálculo.

A informação sobre os consumos de energia na região, baseados em inquéritos ou na comercialização de combustíveis para transportes, é importante para determinar o peso do consumo de energia na área de estudo. Por outro lado, esta informação permite fazer uma primeira análise sobre a credibilidade dos resultados.

Apesar de tudo, esta parece ser uma boa estratégia para iniciar, de um modo simples, o estudo dos consumos de energia, utilizando a informação disponível, porque depois é possível ir progressivamente melhorando e actualizando o sistema para obter melhores

estimativas. Para pequenas cidades onde a energia não é uma preocupação importante, uma metodologia de cálculo simples pode já ser satisfatória.

4. Caracterização da Área de Estudo

4.1. Rede Viária

A informação sobre as características da rede viária é indispensável para a adaptação de modelos de energia existentes para transportes terrestres e para definir os parâmetros mais relevantes a serem considerados no estudo.

Em termos gerais, as principais características da rede viária a serem tidas em consideração, em cada segmento uniforme de rua, para o cálculo do consumo de energia do tráfego automóvel, são:

- comprimento do segmento de rua;
- inclinação média.

No entanto, existem outros dados que podem ser úteis para o estudo:

- sentidos permitidos para a circulação automóvel;
- sinais de trânsito;
- categorias de veículos autorizadas;
- número de faixas;
- largura total da rua;
- velocidade máxima autorizada.

Se um modelo de tráfego ou um Sistema de Informação Geográfica estão já implementados para a área de estudo, alguma desta informação e outros dados podem já estar disponíveis.

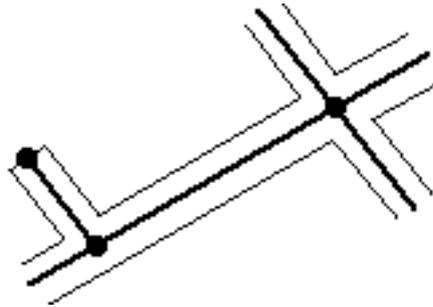
4.1.1. Definição da Rede de Estudo

A definição da área de estudo é um dos primeiros passos para iniciar a modelação do consumo de energia do tráfego automóvel. É necessário definir a extensão da rede viária e a segmentação para tomar em consideração os eventos relevantes nas ruas. Ao estabelecer os critérios para a definição da rede viária, dever-se-á ter em conta que um maior detalhe e extensão da rede viária implica maiores custos, nomeadamente na recolha de dados.

Em primeiro lugar, é recomendado delinear a fronteira da área de estudo e depois seleccionar as ruas a serem consideradas. Se a área não é muito extensa, todas as ruas com tráfego podem ser incluídas no estudo. No entanto, se não for esse o caso, apenas deverão

ser consideradas as ruas com um volume de tráfego superior a um determinado valor, por exemplo, 1 000 veículos/dia. Em qualquer dos casos, é recomendado que se assegure a consistência e a continuidade da rede.

A segmentação da rede viária seleccionada descreve a mudança de características relevantes das ruas ou do tráfego. Um segmento de rua é definido por dois nós e, em cada segmento, o consumo específico de energia deverá ser considerado uniforme, em termos médios, para simplificar o cálculo.



Os cruzamentos e pontos onde existe uma mudança considerável das características relevantes devem ser definidos como nós. Por exemplo, se a inclinação passa de positiva a negativa num determinado ponto, dever-se-á dividir o segmento em dois com um nó.

Uma recomendação geral, para iniciar o estudo do consumo de energia numa cidade, é definir a área de estudo onde a informação é mais fácil de obter. Se um modelo de tráfego ou um Sistema de Informação Geográfica estiver disponível é um bom começo, mas se a informação acerca da rede viária for escassa, sugere-se que o trabalho seja iniciado numa pequena área piloto para produzir resultados num curto espaço de tempo. Deste modo, haverá uma aprendizagem e melhoramentos para a implementação do modelo em toda a área de estudo

4.1.2. Comprimento das Ruas

O comprimento de cada segmento de rua é o parâmetro mais importante acerca da rede viária para calcular o consumo de energia do tráfego. O consumo de energia num segmento de rua uniforme é linearmente proporcional ao seu comprimento.

A informação sobre o comprimento das ruas é bastante fácil de obter, nomeadamente, através do uso de um Sistema de Informação Geográfica, de mapas adequados ou outras fontes ou, ainda, medindo directamente as ruas.

O comprimento apropriado para o estudo é a distância real entre dois pontos expressos como nós. Esses nós são identificados pelos pontos de intersecção do eixo de duas vias ou outro ponto particular da rua. A soma dos comprimentos de todos os segmentos de uma rua deve ser igual ao comprimento total da rua.

Se o segmento de rua tem uma inclinação significativa e o comprimento projectado na horizontal é dado por um mapa ou por um Sistema de Informação Geográfica, então o comprimento real percorrido pelos veículos é o seguinte:

$$L = L_h / \cos[\arctg(P/100)] \text{ [m]}$$

em que:

L - comprimento real do segmento de rua

L_h - comprimento da projecção horizontal do segmento de rua [m]

P - inclinação do segmento de rua [%]

Se o comprimento for medido na rua então não é necessário fazer esta correcção, porque a medição neste caso é de facto o comprimento real do segmento de rua.

4.1.3. Inclinação das Ruas

A inclinação tem uma forte influência no consumo de energia. No entanto, se a área de estudo é plana, esta componente pode ser ignorada.

A inclinação das ruas é normalmente expressa como uma percentagem, que pode ser relacionada com o ângulo entre o eixo da via e a horizontal da seguinte forma:

$$P = 100 \cdot h / L_h = 100 \cdot \tan(\varnothing) \text{ [%]}$$

em que:

P - inclinação do segmento de rua

h - altura da projecção vertical do segmento de rua [m]

L_h - comprimento da projecção horizontal do segmento de rua [m]

∅ - ângulo entre o eixo da via e a horizontal

As inclinações dos segmentos de rua da rede viária podem ser obtidas utilizando equipamento apropriado para medir inclinações sobre o pavimento ou medindo a diferença de altitude entre dois pontos.

Por outro lado, se existe informação cartográfica detalhada, em especial num Sistema de Informação Geográfica, a inclinação média pode ser calculada através da diferença de cota entre dois nós.

4.2. Parque Automóvel

Um conhecimento do parque automóvel envolvido é indispensável para analisar o consumo de energia dos transportes terrestres numa cidade, nomeadamente o número de veículos e as características médias de algumas categorias de veículos que utilizam a rede viária, tais como: veículos ligeiros de passageiros; veículos Diesel ligeiros; autocarros; camiões.

4.2.1. Número de Veículos em Circulação

A quantidade de veículos de cada categoria é um parâmetro importante para a gestão de tráfego. É essencial para extrair amostras representativas de veículos para a realização de estudos mais especializados para caracterizar o parque automóvel e para obter os factores médios de consumo de energia de cada categoria.

Os veículos cujo estudo apresenta maior interesse são os que realmente utilizam a rede da área de estudo, não necessariamente o parque automóvel existente ou operacional na cidade e arredores. No entanto, o parque automóvel existente é muito mais fácil de obter e pode ser uma aproximação aceitável para definir as características médias de cada categoria de veículos considerada para a estimativa do consumo de energia do sector dos transportes.

Para obter o número de veículos operacionais numa área administrativa, cidade ou região, podem ser utilizadas estatísticas ou inquéritos, bem como informação da aplicação de taxas municipais directas, de seguros do ramo automóvel e outras fontes disponíveis. A informação das diferentes fontes pode ser cruzada e, se existir um bom conhecimento do parque automóvel, a informação poderá ser confirmada e escolhida a fonte mais realista.

4.2.2. Idade Média dos Veículos

A caracterização do parque automóvel tendo em conta a idade dos veículos irá melhorar a especificação dos parâmetros e a definição de amostras representativas. No entanto, a principal razão para considerar este elemento é porque, deste modo, é possível avaliar o impacto da penetração de novos veículos e a renovação do parque automóvel numa análise de longo prazo.

Esta informação pode ser obtida da mesma forma que para o número de veículos em circulação, nomeadamente através da consulta das estatísticas disponíveis, inquéritos, serviços de registo e outras fontes.

4.2.3. Classificação por Tipo de Energia

O consumo de energia e o impacto económico, bem como as emissões, ruído e outros efeitos, dependem do tipo de energia utilizado, por exemplo, tipicamente, gasolina e gásóleo, mas também propano, gás natural, electricidade ou outros.

Quando o agrupamento em categorias é efectuado, esta característica pode ser tida em conta. Este é o modo recomendado de considerar o tipo de energia, porque está normalmente relacionado com uma dada categoria de veículos.

Para a caracterização do parque automóvel, esta informação pode ser obtida da mesma forma que o número e a idade dos veículos.

4.2.4. Classificação por Tipo de Utilização

Para calcular indicadores de eficiência energética relacionados com os transportes de passageiros e mercadorias, é necessário ter informação sobre a utilização do parque automóvel.

Para o transporte de passageiros, é importante conhecer a capacidade nominal, taxa de ocupação média, número de viagens, distância média percorrida em cada viagem e outra informação necessária para o cálculo dos indicadores pretendidos. Um indicador a calcular pode ser, por exemplo, o consumo de energia por passageiro-km, para diferentes categorias de veículos e diferentes tipos de utilização.

Para o transporte de mercadorias, é importante conhecer, entre outros, a capacidade nominal dos veículos, a carga média e a distância percorrida em cada deslocação. Um indicador que pode ser calculado é o consumo por tonelada-km, para diferentes tipos de veículos utilizados no transporte de mercadorias.

A obtenção desta informação não é tão fácil como para outros casos, porque está normalmente dispersa. O primeiro passo é procurar nas estatísticas disponíveis e fontes de informação sobre a actividade de frotas de transportes terrestres (transportes públicos, transporte e distribuição de mercadorias), inquéritos e outras fontes possíveis.

A principal dificuldade é obter informação sobre o transporte privado, nomeadamente os ligeiros de passageiros, e o melhor processo deverá ser a realização de um inquérito. Se o inquérito for considerado necessário, será oportuno acrescentar algumas questões para recolha de outros elementos, tais como as necessidades de mobilidade, consumos médios de energia, quilometragem anual, características técnicas dos veículos e outra informação que pode ser útil para uma melhor compreensão das necessidades de transporte na cidade.

5. Formulação de um Modelo de Energia

5.1. Princípios da Formulação

Se não há um modelo disponível para calcular o consumo de energia do tráfego, o procedimento recomendado é a adaptação de um modelo existente ou a formulação de um algoritmo baseado na informação disponível sobre consumos de energia, tendo em conta a influência de algumas características da rede viária e da circulação de tráfego.

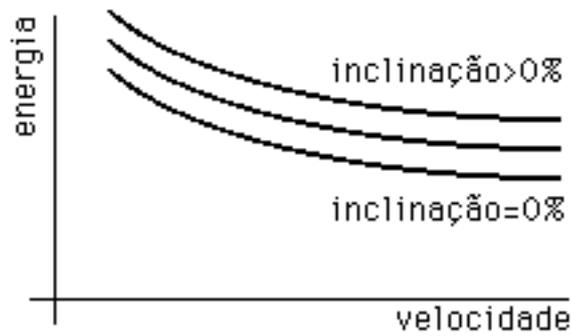
Os principais parâmetros para calcular o consumo de energia na rede viária são:

- extensão da rede viária;
- volumes de tráfego;
- categorias dos veículos e tipo de energia utilizada;
- velocidade média do tráfego;
- inclinação da via.

Outros elementos que influenciam o consumo de energia podem ser incluídos nos factores específicos ou podem ser contemplados por alguns dos parâmetros referidos. Por exemplo, as paragens e arranques, que aumentam o consumo de energia, podem ser expressos, em termos médios, através do parâmetro da velocidade média. Os efeitos climáticos, altitude e outras condições ambientais, cuja influência seja homogénea em toda a área de estudo, estão implícitos nos factores de consumo de energia, se estes forem determinados ou adaptados para o parque automóvel da área de estudo, em condições normais.

Quanto menos parâmetros tiver a formulação, mais simples será o modelo e a sua implementação. Apenas os parâmetros que variam dentro da área de estudo devem ser evidenciados. O efeito dos elementos que têm uma influência homogénea no consumo de energia estão implícitos na determinação dos factores específicos do consumo de energia. Os outros factores relevantes podem ser agregados e expressos como velocidade média e inclinação das ruas.

O consumo específico de energia, que depende essencialmente da velocidade média e da inclinação da rua, apresenta tipicamente a seguinte forma, para a gama de velocidades médias comuns em zonas urbanas:



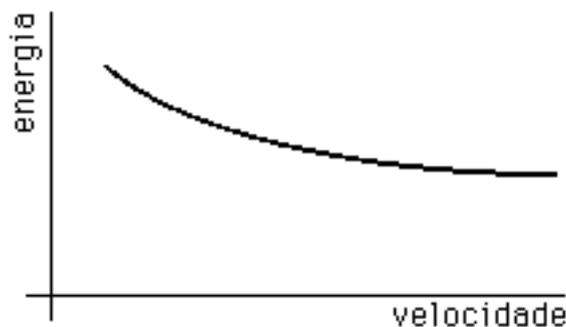
O consumo de energia de um segmento de rua é obtido pela multiplicação do consumo específico de energia pelo fluxo de tráfego e pelo comprimento desse segmento. O consumo de energia numa determinada área é obtido pela soma dos segmentos de rua correspondentes.

5.1.1. Influência da Velocidade Média

Considerar a influência de diferentes elementos relacionados com o comportamento do tráfego no consumo de energia, nomeadamente a velocidade, paragens e arranques é bastante complicado, necessitando de muita informação detalhada e especializada, que deverá ser sempre actualizada para continuar válida.

Para além disso, o esforço adicional para isolar as diferentes influências de cada componente não garante uma melhoria significativa dos resultados, porque os erros inerentes ao processo de recolha de informação vão ser amplificados durante o cálculo se houver muitos parâmetros considerados individualmente.

A velocidade média é razoavelmente simples de determinar e pode descrever satisfatoriamente o comportamento do tráfego, nomeadamente as paragens curtas e os arranques. A influência da velocidade média no consumo de energia em meio urbano apresenta, tipicamente, a seguinte forma:



A razão pela qual o consumo de energia aumenta quando a velocidade média diminui é porque esta situação toma em conta o aumento das revoluções do motor e as possíveis paragens e arranques.

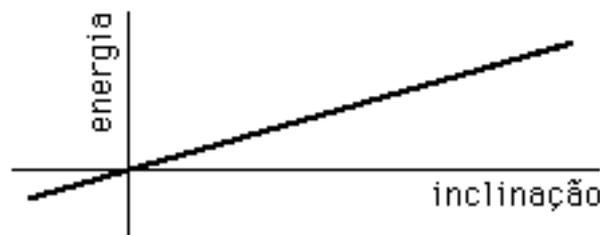
Para verificar esta influência, em função da velocidade média, o consumo de energia de uma amostra representativa de veículos pode ser medida em diferentes condições de circulação de tráfego, medindo simultaneamente a velocidade média.

Pode ser compilada uma tabela com os valores do consumo de energia medidos e a correspondente velocidade média. Utilizando métodos estatísticos pode ser determinada uma curva para descrever a influência da velocidade média no consumo de energia.

No entanto, para efectuar este estudo, é conveniente eliminar a influência da inclinação, nomeadamente, através da escolha de ruas planas onde for possível. De outra forma, se a influência da inclinação for conhecida, poderá ser subtraída para isolar o efeito da velocidade média.

5.1.2. Influência da Inclinação Média

A influência da inclinação de uma rua, a qual é expressa em percentagem, sobre o consumo de energia apresenta aproximadamente a seguinte forma:



Este aumento do consumo de energia causado pela inclinação deve-se à energia potencial gravítica adicional que é necessário vencer para subir uma rua inclinada, que pode ser expressa da seguinte forma:

$$gpe = 9,8 * m * (h - h_0) \text{ [J]}$$

em que:

gpe - energia potencial gravítica

m - massa total do veículo [kg]

h-h₀ - variação de altitude [m]

O consumo adicional de energia para vencer uma subida é aproximadamente igual à variação de energia potencial, que depende da inclinação e da massa total do veículo, se as rotações do motor e a velocidade forem mantidas, em comparação com uma rua plana. O

aumento da carga do motor nestas condições é satisfeito apenas pelo aumento do binário, porque a potência debitada por um motor é dada por:

$$P_d = W * B \text{ [W]}$$

em que:

P_d - potência debitada pelo motor

W - velocidade angular do veio do motor [rad/s]

B - binário no veio do motor [N.m]

Nesta perspectiva, o aumento do consumo de energia é proporcional à inclinação e à massa dos veículos e pode ser definido, em termos médios, para cada categoria de veículos considerada.

O aumento do consumo de energia pode ser estimado como se segue:

$$ep(i) = P * m(i) / 10200 \text{ [kJ/(m.veículo)]}$$

em que:

$ep(i)$ - aumento do consumo de energia, por unidade de comprimento, causado pela inclinação, por veículo de cada categoria

P - inclinação média no segmento de rua [%]

$m(i)$ - massa total média, para cada categoria de veículos [kg]

i - índice para a categoria (ex: veículos ligeiros de passageiros; veículos Diesel ligeiros; autocarros; camiões)

Para inclinações negativas, o consumo de energia depende fortemente da tecnologia do motor, porque existem sistemas electrónicos utilizados nos motores de injeção para minimizar o fornecimento de combustível, quando o veículo está a descer ou durante as travagens.

Se a área de estudo for plana, então o termo correspondente à influência da inclinação pode ser omitido do algoritmo de cálculo para o consumo de energia do tráfego.

5.2. Factores Específicos de Energia

A determinação dos factores específicos de consumo de energia em veículos é o trabalho mais especializado no estudo da energia. Para determinar estes factores, seria necessário proceder à recolha de um série de dados estatisticamente representativos das características reais que influenciam o consumo de energia na área de estudo e processar essa informação.

Este é o método mais preciso para determinar os factores de consumo de energia para a área de estudo, porque muitas das variáveis que influenciam o consumo de energia ficam implícitas no processo. No entanto, este método é longo e dispendioso e, em muitos casos, a adaptação de factores de consumo de energia disponíveis na bibliografia e de outros estudos realizados para fins similares, pode ser satisfatória, dependendo da precisão necessária.

A bibliografia e os estudos, onde os factores específicos de consumo de energia podem ser encontrados, deverão considerar as categorias de veículos identificadas na área de estudo e cada categoria deverá estar bem definida e caracterizada. Os factores de consumo de energia deverão ter sido determinados para diferentes valores de velocidade média. Seria também de interesse que a influência da inclinação tivesse sido considerada.

Para além disso, é importante saber sobre as condições utilizadas para determinar os factores de consumo de energia e sobre a sua validade em diferentes condições. Isto permitirá uma melhor adaptação dos factores à rede viária de estudo actual.

Algumas simplificações para a adaptação dos factores de consumo de energia podem ser efectuadas. No entanto, isso é muito crítico e pode causar grandes distorções nos cálculos de energia. Por essa razão, é recomendado que, quando se proceder à adaptação de outros estudos, os factores relevantes que afectam o consumo específico de energia e os objectivos do estudo actual de energia sejam tidos em consideração.

Os factores específicos de consumo de energia baseados em medições podem ser expressos graficamente como pontos em função da velocidade média e da inclinação da rua. Depois de processamento estatístico, estes factores podem ser expressos numa tabela e, por manipulação matemática, podem ser transformados em fórmulas:

$$e(i) = \text{função (S, P)} \text{ [kJ/(m.veículo)]}$$

em que:

$e(i)$ - consumo específico de energia, por unidade de comprimento, por veículo de cada categoria

S - velocidade média do tráfego no segmento de rua [km/h]

P - inclinação do segmento de rua [%]

i - índice para a categoria (ex: veículos ligeiros de passageiros; veículos Diesel ligeiros; autocarros; camiões)

5.3. Formulação do Algoritmo

De modo a construir um modelo de energia funcional para calcular os consumos na área de estudo e simular diferentes cenários, é necessário exprimir estes factores como fórmulas, de modo a tornar estes cálculos apropriados para serem implementados em ferramentas informáticas adequadas.

Tendo os factores de consumo de energia numa tabela, para diferentes valores de velocidade média e inclinação da rua, baseados nas características do parque automóvel e da rede viária, o algoritmo para o cálculo do consumo de energia na área de estudo pode ser construído por manipulação matemática:

O algoritmo pode sintetizar-se da seguinte forma:

$$E_{total} = \sum E \text{ [kJ]}$$

$$E = \sum E(i) \text{ [kJ]}$$

$$E(i) = e(i) * N(i) * L \text{ [kJ]}$$

$$e(i) = \text{função (S, P) [kJ/(m.veículo)]}$$

em que:

E_{total} - consumo total de energia na área de estudo, durante um dado período de tempo (hora, dia, semana, ano)

E - consumo de energia num segmento de rua, durante um dado período de tempo (hora, dia, semana, ano)

$E(i)$ - consumo de energia para cada categoria num segmento de rua, durante um dado período de tempo (hora, dia, semana, ano)

$e(i)$ - consumo específico de energia, por unidade de comprimento, por veículo de cada categoria

$N(i)$ - volume de tráfego através duma secção de rua, para cada categoria de veículos, durante um dado período de tempo [veículos/(hora, dia, semana, ano)]

L - comprimento dum segmento de rua [m]

S - velocidade média do tráfego num segmento de rua [km/h]

P - inclinação média dum segmento de rua [%]

i - índice para a categoria (ex: veículos ligeiros de passageiros; veículos Diesel ligeiros; autocarros; camiões)

De seguida, é necessário definir $e(i)$, o qual pode ser dividido da seguinte forma:

$$e(i) = es(i) + ep(i) \text{ [kJ/(m.veículo)]}$$

em que:

$es(i)$ - consumo específico de energia numa rua plana, por unidade de comprimento, por veículo de cada categoria [kJ/(m.veículo)]

$ep(i)$ - acréscimo do consumo específico de energia causado por uma inclinação, por unidade de comprimento, por veículo de cada categoria [kJ/(m.veículo)]

Tendo e conta que $ep(i)$ representa o aumento da energia potencial:

$$ep(i) = P * m(i) / 10200 \text{ [kJ/(m.veículo)]}$$

em que:

P - inclinação média dum segmento de rua [%]

$m(i)$ - massa total média para cada categoria de veículos [kg]

Resta agora definir $es(i)$, que é a expressão que descreve o consumo específico de energia numa rua plana em função da velocidade média do tráfego.

A partir de uma tabela genérica com os factores de consumo de energia (es_0, es_1, es_2, es_3), onde o efeito da inclinação é nulo, para diferentes valores da velocidade (S_0, S_1, S_2, S_3), para cada categoria de veículos:

S	es
S0	es0
S1	es1
S2	es2
S3	es3

$$S_1 - S_0 = S_2 - S_1 = S_3 - S_2$$

O termo $es(i)$ pode ser formulado por interpolação polinomial:

$$es(i) = a*S^3 + b*S^2 + c*S + d$$

em que:

$$a = k_3$$

$$b = k_2 - 3 \cdot k_3 \cdot S_1$$

$$c = k_1 - k_2 \cdot (S_0 + S_1) + k_3 \cdot (2 \cdot S_0 \cdot S_1 - S_0^2 + 2 \cdot S_1^2)$$

$$d = k_0 - k_1 \cdot S_0 + k_2 \cdot S_0 \cdot S_1 + k_3 \cdot S_0 \cdot S_1 \cdot (S_0 - 2 \cdot S_1)$$

e:

$$k_0 = es_0$$

$$k_1 = (es_1 - es_0) / (S_1 - S_0)$$

$$k_2 = (es_2 - 2 \cdot es_1 + es_0) / (2 \cdot (S_1 - S_0)^2)$$

$$k_3 = (es_3 - 3 \cdot es_2 + 3 \cdot es_1 - es_0) / (6 \cdot (S_1 - S_0)^3)$$

5.4. Exemplo de Formulação de um Algoritmo

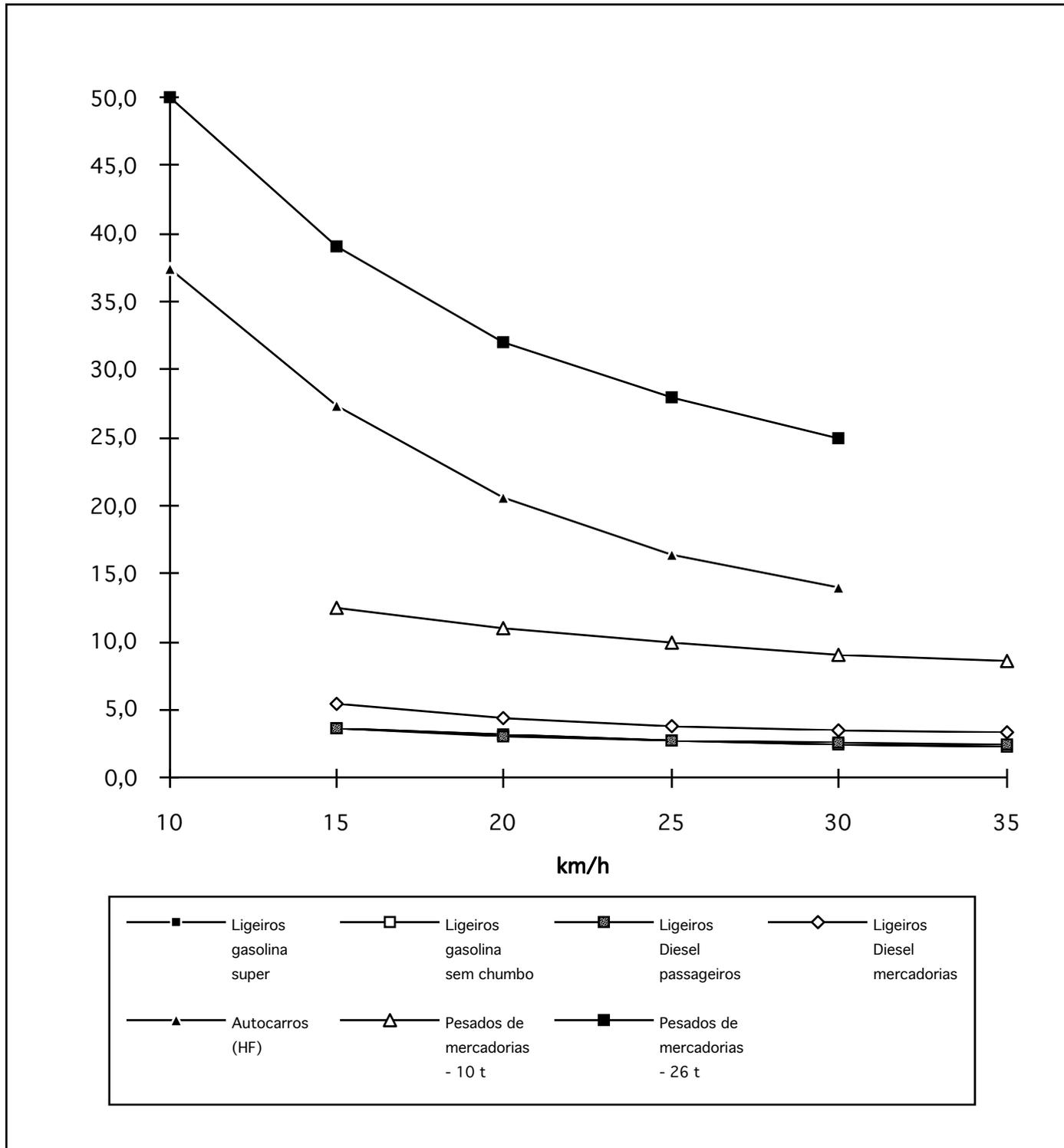
Para ilustrar os passos seguidos anteriormente, é apresentado de seguida um exemplo de formulação de um algoritmo para calcular o consumo de energia em veículos, em função da velocidade média, categoria e inclinação da rua.

Tendo a seguinte tabela com factores de consumo específico de energia de veículos, por categoria, para diferentes valores de velocidade média:

	[kJ/m]					
<i>Velocidade Média [km/h]</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>20</i>	<i>25</i>	<i>30</i>	<i>35</i>
Ligeiros gasolina super		3,6	3,2	2,8	2,5	2,3
Ligeiros gasolina sem chumbo		3,6	3,2	2,8	2,5	2,3
Ligeiros Diesel passageiros		3,6	3,1	2,8	2,6	2,4
Ligeiros Diesel mercadorias		5,5	4,4	3,8	3,5	3,3
Autocarros (HF)	37,4	27,4	20,6	16,4	14,0	
Pesados de mercadorias - 10 t		12,5	11,0	9,9	9,1	8,6
Pesados de mercadorias - 26 t	50,0	39,0	32,0	28,0	25,0	

Nota: O consumo de energia dos autocarros é baseado em medições da Horários do Funchal (HF). Os outros factores foram baseados na bibliografia e estudos específicos sobre o consumo de energia em transportes urbanos.

Que pode ser representada graficamente como se segue:



E, para o cálculo do efeito da inclinação, considera-se que a massa média dos veículos, $m(i)$ [kg], para cada categoria, é a seguinte:

- 1) Ligeiros a gasolina com chumbo : $m(1) = 970$ kg
- 2) Ligeiros a gasolina sem chumbo : $m(2) = 970$ kg

- 3) Ligeiros Diesel de passageiros..... : $m(3) = 1\ 250\ \text{kg}$
- 4) Ligeiros Diesel de mercadorias : $m(4) = 1\ 850\ \text{kg}$
- 5) Autocarros (HF)..... : $m(5) = 13\ 000\ \text{kg}$
- 6) Pesados de mercadorias - 10 t : $m(6) = 7\ 000\ \text{kg}$
- 7) Pesados de mercadorias - 26 t : $m(7) = 18\ 000\ \text{kg}$

Através dos procedimentos anteriormente apresentados:

$$e(i) = e_s(i) + e_p(i) \text{ [kJ/(m.veículo)]}$$

Em que $e_s(i)$ é dado por interpolação polinomial da tabela de factores de consumo específico de energia.

Tendo a inclinação média da rua P [%] e a massa média $m(i)$ [kg] de cada categoria, $e_p(i)$ é dado por:

$$e_p(i) = P * m(i) / 10200 \text{ [kJ/(m.veículo)]}$$

O consumo específico de energia, por metro, por veículo, $e(i)$ [kJ/(m.veículo)], pode ser expresso pelas seguintes fórmulas, para cada categoria, em função da velocidade média S [km/h] do veículo e inclinação média P [%] do segmento de rua:

- 1) Ligeiros a gasolina com chumbo:
 $e(1) = S^2/666,7 - 0,140 * S + 5,36 + 0,095 * P$
- 2) Ligeiros a gasolina sem chumbo:
 $e(2) = S^2/666,7 - 0,140 * S + 5,36 + 0,095 * P$
- 3) Ligeiros Diesel de passageiros:
 $e(3) = -S^3/30000 + 0,0045 * S^2 - 0,219 * S + 5,99 + 0,122 * P$
- 4) Ligeiros Diesel de mercadorias:
 $e(4) = -S^3/6000 + 0,0185 * S^2 - 0,706 * S + 12,49 + 0,181 * P$
- 5) Autocarros (HF):
 $e(5) = -0,0009 * S^3 + 0,1045 * S^2 - 4,178 * S + 69,59 + 1,274 * P$
- 6) Pesados de mercadorias - 10 t:
 $e(6) = -S^3/7500 + 0,0165 * S^2 - 0,757 * S + 20,59 + 0,686 * P$
- 7) Pesados de mercadorias - 26 t:
 $e(7) = -0,0015 * S^3 + 0,1425 * S^2 - 4,962 * S + 86,44 + 1,765 * P$

Os pontos de interpolação foram: $S=\{15, 25, 35, 45\}$ [km/h], para *Ligeiros a gasolina com chumbo*, *Ligeiros a gasolina sem chumbo*, *Ligeiros Diesel de passageiros*, *Ligeiros Diesel de mercadorias* e *Pesados de mercadorias - 10 t*. Para *Autocarros (HF)* e *Pesados de mercadorias - 26 t*, os pontos de interpolação foram: $S=\{5, 15, 25, 35\}$ [km/h].

Para calcular o consumo diário de energia de cada categoria num segmento de rua, é necessário multiplicar o factor $e(i)$ [kJ/(m.veículo)] pelo número de veículos $N(i)$ [veículos/dia], e o comprimento do segmento de rua L [m]:

$$E(i) = e(i) * N(i) * L \text{ [kJ/dia]}$$

O consumo total no segmento de rua é a soma de todas as categorias:

$$E = \sum E(i) \text{ [kJ/dia]}$$

O consumo total de energia na rede viária de estudo é a soma de todos os segmentos de rua:

$$E_{total} = \sum E \text{ [kJ/dia]}$$

6. Cálculo do Consumo de Energia

Para estudar o consumo de energia numa rede viária, utilizando uma metodologia baseada na análise rua a rua, é necessário implementar o modelo de energia e recolher dados sobre o tráfego na área de estudo, para a estimativa do consumo actual e elaborar cenários alternativos.

6.1. Implementação do Modelo

O algoritmo para calcular o consumo de energia do tráfego deve ser integrado numa aplicação informática, por exemplo, como um módulo adicional num modelo de tráfego ou de outros modelos disponíveis para calcular a poluição do ar ou o ruído causado pelo tráfego. No mínimo, o cálculo da energia pode ser efectuado numa folha de cálculo comum.

O modelo de energia pode ser incorporado num sistema integrado e relacionado com modelos de tráfego, de qualidade do ar e outros cálculos, partilhando a mesma base de dados.

O cálculo do consumo de energia pode também ser ligado a um Sistema de Informação Geográfica (GIS), dando, neste caso, a possibilidade de relacionar os consumos de energia com outra informação disponível no sistema para produzir diversos indicadores úteis.

O GIS tem uma flexibilidade muito grande e permite relacionar diferentes fontes de informação geo-referenciadas, bem como a produção de mapas com diversos indicadores. Esta característica do GIS é útil para integrar a informação e apoiar a tomada de decisão, relacionando dados sobre tráfego, poluição do ar, ruído, população, economia local, actividades e outra informação disponível.

6.2. Circulação de Tráfego

Os dados sobre a circulação de tráfego necessários para o modelo de energia em estudo são os volumes de tráfego para cada categoria de veículos definida e a velocidade média, em cada segmento de rua da rede viária de estudo.

6.2.1. Volumes de Tráfego

O volume de tráfego constitui a principal variável que influencia o consumo de energia num dado segmento de rua da rede de estudo.

Para além disso, os volumes de tráfego são um dos componentes principais da gestão de tráfego que podem ser alterados através de medidas das autoridades locais. Consequentemente, os volumes de tráfego, para cada categoria de veículos, em cada segmento de rua, são elementos muito importantes.

Se um modelo de tráfego estiver operacional e puder fornecer fluxos de tráfego na rede viária, estes dados podem ser utilizados para o cálculo da energia. De outra forma, para obter dados sobre os volumes de tráfego, é necessário proceder a contagens na rede viária de estudo.

Os volumes de tráfego devem satisfazer os seguintes requisitos:

- os volumes de tráfego devem ser especificados para cada categoria de veículos considerada no estudo;
- os fluxos de tráfego devem ser determinados para cada segmento de rua da rede de estudo;
- se um segmento de rua apresenta uma inclinação e o tráfego circula nos dois sentidos, é necessário determinar os fluxos em ambos os sentidos;
- os volumes de tráfego devem ser válidos para os períodos considerados para o cálculo de energia (hora, dia, semana, ano).

Se não existe um modelo de tráfego disponível e são necessárias contagens para recolher a informação pretendida, alguns métodos podem ser adoptados, dependendo dos recursos disponíveis:

- utilização de sensores automáticos para contagem do número de veículos que atravessa uma dada secção de rua;
- contagens de tráfego por observação, utilizando equipamento adequado para registar o número de veículos de diferentes categorias;
- contagens de tráfego por observação, utilizando registos manuais para contar o número de veículos de diferentes categorias.

Contagens de tráfego automáticas, recorrendo a sensores debaixo ou sobre o pavimento, devem ser complementadas com observação, para determinar a percentagem de veículos de cada categoria, apesar de alguns destes sensores já permitirem identificar certas classes de veículos.

Se houver informação estatística disponível sobre os transportes públicos ou outras frotas de veículos que circulem numa secção de rua, durante um dado período de tempo, as contagens podem ser confirmadas com esses dados. Se essa informação estatística está disponível, é possível identificar variações semanais e sazonais e, provavelmente, esta informação é mais fiável do que as próprias contagens de tráfego. Neste caso, as estatísticas existentes devem ser utilizadas para o cálculo do consumo de energia e para validar as contagens de tráfego para outras categorias.

As contagens de tráfego podem ser realizadas durante certos períodos do dia e extrapoladas para 24 horas. Neste caso, é necessário determinar o factor extrapolador na área de estudo,

que pode ser obtido através de contagens de 24 horas em secções de rua estratégicas. Um procedimento similar pode ser adoptado para tomar em consideração as variações sazonais dos volumes de tráfego ao longo do ano.

No entanto, se as extrapolações são necessárias, é recomendado seguir os métodos estatísticos standard ou procedimentos sugeridos na literatura especializada sobre tráfego.

Para qualquer método adoptado, existem algumas recomendações gerais:

- estabelecimento de um plano de intervenção, cobrindo todos os segmentos de rua em estudo;
- o plano de intervenção deve estar calendarizado de modo a não incluir eventos especiais, fins de semana, feriados e desvios sazonais;
- o período de intervenção deve ser o mais curto possível.

As contagens de tráfego podem ser implementadas como uma prática regular, pelo menos uma vez por ano. Se um modelo de tráfego for instalado para a área de estudo, este procedimento será mais fácil de cumprir.

6.2.2. Velocidade Média

Os procedimentos para determinar a velocidade média do tráfego não são muito complexos. Medindo simultaneamente o tempo dispendido e a distância percorrida por um veículo, a velocidade média é dada por:

$$S = 3,6 * d / t$$

em que:

S - velocidade média [km/h]

d - distância percorrida [m]

t - tempo dispendido [s]

A velocidade média, em princípio, deveria ser calculada para cada categoria e para cada segmento de rua. No entanto, é aceitável e até sugerido que sejam agregadas ruas de características semelhantes bem como algumas categorias de veículos. Os segmentos devem ser agregados como um trajecto e a velocidade média será medida para toda a sua extensão. As categorias de veículos podem ser agregadas como ligeiros, autocarros e pesados de mercadorias.

Existem vários procedimentos sugeridos na literatura especializada para realizar estas medições. Em termos gerais, estas medições podem ser efectuadas utilizando uma viatura

que circula com o tráfego ou por observação externa dos veículos que passam por dois pontos identificados.

No primeiro caso, uma viatura equipada com um conta-quilómetros de precisão, para medir a distância percorrida ou a informação sobre os comprimentos das ruas, e um cronómetro, podem ser suficientes para determinar a velocidade média.

Utilizando este método, é necessário repetir o mesmo percurso em diferentes condições de circulação para ter um número representativo de medições. Por outro lado, o percurso deve ser razoavelmente extenso para incluir diversos segmentos de rua, sinais de trânsito, cruzamentos e outras características particulares da rede, de modo a reduzir os possíveis erros e a variância das medições causada por ocorrências pontuais.

A viatura que efectua as medições deve ser discreta e passiva para evitar alterações no comportamento normal do tráfego. Existem algumas regras para cumprir neste processo: por exemplo, se a viatura de estudo for ultrapassada por outra, é necessário ultrapassar uma outra, de modo a compensar e a ter-se um balanço nulo de ultrapassagens.

A velocidade média dos autocarros é diminuída pelas paragens adicionais solicitadas. Para medir a velocidade média dos autocarros, o procedimento pode ser o mesmo, utilizando o autocarro como viatura de estudo, mas uma outra solução pode ser seguir o autocarro com a viatura equipada para as medições.

A velocidade média pode variar com a alteração de muitas condicionantes ao longo do dia e da semana e ainda com acontecimentos sazonais, sendo por vezes difícil obter um valor estável para o cálculo do consumo de energia. No entanto, uma aproximação inicial da velocidade média, baseada em algumas medições, é aceitável para começar a produzir alguns resultados e, posteriormente, as medições e o sistema de cálculo podem ser melhorados.

6.3. Análise dos Resultados

A partir do cálculo do consumo de energia numa base rua a rua, vários indicadores primários podem ser produzidos, nomeadamente:

- consumo de energia na rede global;
- consumo de energia em cada segmento de rua;
- a repartição do consumo de energia por cada categoria de veículos.

A introdução desta informação no GIS, bem como uma prática que integre a análise do consumo de energia para apoiar o planeamento, vai proporcionar aos decisores ferramentas úteis para simular e otimizar o sistema de transportes, possibilitando que muitos aspectos e critérios de sustentabilidade sejam considerados e relacionados com a utilização da energia.

Utilizando o GIS é também possível relacionar os consumos de energia com outras informações para calcular novos indicadores e produzir mapas para realçar aspectos importantes para a decisão.

O GIS pode enriquecer significativamente os resultados do modelo de energia, tornando possível a produção de indicadores importantes, através do relacionamento dos resultados obtidos dos consumos de energia com outra informação disponível na base de dados do GIS. Alguns indicadores que podem ser produzidos são, por exemplo:

- comparação do consumo de energia por passageiro-km ou tonelada-km transportados em cada categoria;
- impacte económico e social;
- ponderação dos custos da energia para transportes;
- consumo de energia dos transportes por quilómetro quadrado;
- consumo de energia por habitante.

7. Outros Métodos

O método de cálculo do consumo de energia rua a rua é o mais adequado para a modelação da energia em tráfego urbano, em especial, quando outros cálculos são também necessários na mesma base rua a rua, tal como a qualidade do ar e o ruído, porque muitos dos dados requeridos são comuns.

No entanto, existem outros métodos para calcular o consumo de energia do tráfego. Em vez de um segmento de rua pode ser considerada uma viagem, recorrendo a ciclos standard para o consumo de energia de cada categoria. Este método é recomendado para áreas dispersas. A distribuição espacial do consumo de energia não é boa e é muito difícil de obter em áreas urbanas muito densas. Este método é menos flexível e necessita de uma matriz Origem-Destino para gerar as viagens e dos factores de consumo de energia dos veículos em condições médias. Este é mais um modelo energia-transportes a nível regional do que um modelo energia-tráfego para uma área urbana.

Esta metodologia pode ter em consideração o número médio de paragens, acelerações, categorias, velocidade média, comprimento da viagem e outros parâmetros relacionados com o comportamento normal do tráfego, mas as características locais da rede viária, especialmente a inclinação, ou as condições de tráfego, num ponto particular, não são fáceis de ter em conta.

Os elementos para estes cálculos do consumo de energia podem ser encontrados num estudo realizado pela Universidade Técnica da Dinamarca (“Individual and Public Transportation — Emissions and Energy Consumption Models”, Report RE 91-5). Neste estudo, estão disponíveis factores de consumo de energia em função da categoria e do ciclo de condução (velocidade, acelerações, paragens).

Uma metodologia simples para calcular o consumo global de energia num dada área pode ser a multiplicação do total de veículos-km pelo consumo de energia médio por km de cada categoria considerada. Se a ocupação ou a carga média forem conhecidas para cada categoria, é possível determinar o consumo de energia para transportar um indivíduo ou uma tonelada de mercadorias. O consumo global de energia pode ser obtido com base em estimativas de passageiros-km e toneladas-km transportadas na área de estudo.

Esta metodologia é simples e pode proporcionar resultados satisfatórios para cidades pequenas, dependendo dos objectivos do estudo. No entanto, este cálculo é limitado porque o resultado é o consumo global de energia para cada categoria estudada numa dada área. As características da rede viária e as condições de circulação não são tomadas em consideração.

Em Leicester, foi adoptada uma outra metodologia para estimar o consumo de energia dos transportes, designadamente, de passageiros e de mercadorias. Relativamente ao transporte de passageiros, foi estimado o número de viagens mensal por pessoa, bem como o comprimento médio de cada viagem, utilizando diferentes modos de transporte: autocarro; comboio; e viatura privada. O consumo total de energia para cada modo de transporte foi

calculado com base em: ocupação, expressa como o número de passageiros por veículo; consumo de combustível do veículo; comprimento médio das viagens; número de viagens por indivíduo; proporção da população que utiliza cada modo de transporte.

O cálculo do consumo de energia do transporte de mercadorias baseou-se na estimativa de toneladas-km geradas em cada sub-sector. O indicador toneladas-km foi considerado directamente proporcional ao PIB de cada sub-sector (ajustado com a inflação). Para cada sub-sector, estimou-se a quantidade de energia necessária ao transporte de uma tonelada-km, para cada categoria.

Em Newcastle, foi utilizada uma outra metodologia. Foram efectuadas contagens de tráfego em intervalos regulares durante um período de 12 horas, em locais estratégicos. Para obter o volume de tráfego equivalente para 24 horas foi utilizado o factor multiplicativo de 1,25. Estas contagens de tráfego permitiram saber o número total de veículos e a sua repartição por categorias.

Um modelo de computador para simular o movimento dos veículos foi utilizado para calcular o valor de veículos-km percorridos na cidade num dia típico. A estimativa resultou num total de 2 714 954 veículos-km, com uma velocidade média correspondente de 39 km/h.

Para além desta informação, foi recolhida informação sobre o consumo de combustível nos veículos. Os factores de consumo de energia foram determinados utilizando testes standard, que simulam um ciclo urbano em condições laboratoriais. O parque automóvel foi caracterizado utilizando o registo nacional de automóveis. Outros factores que influenciam o consumo de energia, como a taxa de ocupação, também foram tomados em consideração.

Estes outros métodos apresentados de forma sumária são satisfatórios para o cálculo global do consumo de energia em toda a área de estudo e a repartição pelos vários modos de transporte. No entanto, a distribuição espacial do consumo não é fácil de obter. Por essa razão, para relacionar a informação sobre consumos de energia com uma base de dados cartográfica, um modelo rua a rua é mais adequado. Para além disso, a maior parte da informação necessária é comum a outros cálculos rua a rua, como é o caso do ruído e da qualidade do ar.

8. Caso de Estudo do Funchal

8.1. Introdução

A Região Autónoma da Madeira é um arquipélago constituído por duas ilhas habitadas, a Madeira e o Porto Santo, e por dois grupos de pequenos ilhéus sem população fixa. Localizada no Oceano Atlântico, a 800 km da costa de África e a 980 km de Lisboa, a sua superfície territorial estende-se por 796,77 km². A população residente ronda os 260 000 habitantes e a população flutuante cerca de 10 000.

O sector terciário chama a si as principais actividades económicas da Região, nomeadamente, o turismo, os transportes, as comunicações e outros serviços, representando aproximadamente 55% do PIB total. As actividades agrícolas e piscatórias, que representam 15% do PIB, manifestam, contudo, presentemente, tendência para um decréscimo progressivo. À indústria e à construção corresponde, respectivamente, cerca de 10 e 14% do PIB.

A Ilha da Madeira, a mais importante do arquipélago, tem uma área de 736,75 km² e acolhe cerca de 98% da população total da Região. A cidade do Funchal, que integra quase metade da população total da Região, é a principal cidade da Ilha da Madeira e fica localizada na costa sul. Uma orografia agreste caracteriza fisicamente o Funchal e é responsável pela dificuldade de exploração da terra e pelo habitat disperso, sobretudo nas zonas altas da cidade.

A maior parte das actividades económicas, tais como as comerciais e os serviços administrativos, está concentrada no centro histórico da cidade, ao passo que poucas actividades deste tipo se encontram nas áreas residenciais. As principais infraestruturas turísticas encontram-se também perto do centro da cidade.

8.2. Situação do Tráfego no Funchal

O Funchal, a cidade mais antiga do Atlântico, foi fundada no Século XVI e o seu desenvolvimento no passado não foi adequado para suportar o tráfego automóvel actual.

A situação do tráfego é crítica nos dias de hoje, devido sobretudo a condicionantes de ordem física, relacionadas com as características orográficas e a antiguidade das infraestruturas. O trânsito automóvel torna-se cada vez mais congestionado, dando origem ao desconforto e à degradação da qualidade de vida, o que, em última análise, prejudica a imagem do Funchal, como cidade turística que é.

O centro histórico do Funchal caracteriza-se por ruas estreitas, constituídas por zonas de passeio para peões e pela faixa de rodagem para os veículos motorizados, apresentando-se por vezes muito congestionado.

Uma outra característica da rede viária são as inclinações acentuadas. Ruas com inclinação superior a 10%, são frequentes no Funchal, havendo ruas com inclinação de 24% percorridas por autocarros de transporte público.

Desde 1985, o trânsito automóvel tem vindo a aumentar consideravelmente no centro da cidade, devido sobretudo a um maior número de veículos particulares, causando problemas de circulação e aumentando a poluição atmosférica, o ruído, os acidentes e outros conflitos com os peões.

O volume de tráfego, tanto de veículos, como de peões, é considerável. O número de veículos é extremamente elevado na maioria das ruas e aproxima-se, ou excede, o limite recomendado da sua capacidade. Os problemas de congestionamento resultam da combinação dos volumes de tráfego com a inadequação da rede viária.

A falta de circulares no Funchal, implicando que todo o tráfego entre as zonas oriental e ocidental da cidade se faça através do centro, constitui provavelmente uma das razões do congestionamento.

Esta situação, contudo, tende a modificar-se com a circular interior ("Cota 40"). Outra importante circular ("Cota 200") está em construção e constituirá um *bypass* ao Funchal. Duas outras importantes razões dos problemas de congestionamento prendem-se com o estacionamento e com os hábitos e características dos utentes de viaturas particulares. A Câmara Municipal do Funchal e alguns investidores privados construíram novos parques de estacionamento no centro da cidade. Contudo, ainda é elevada a procura de local para estacionar, no centro da cidade, o que provoca um desnecessário aumento de tráfego.

Para além disso, é muito frequente o estacionamento ilegal, por exemplo, nos passeios e praças, ou em segunda fila, situação que também contribui para o congestionamento do tráfego nas ruas estreitas, especialmente para os autocarros. A Câmara Municipal do Funchal está a modificar esta situação, através da melhoria das zonas pedonais e da construção de barreiras, impedindo o estacionamento irregular gratuito no centro da cidade.

Uma outra razão dos problemas de congestionamento liga-se à concentração tanto das actividades comerciais, como das administrativas, no centro do Funchal, encontrando-se poucas destas actividades nas áreas residenciais. Esta situação é, contudo, comum em cidades deste tipo e dimensão, não sendo muito fácil alterá-la.

8.3. Consumo de Energia

Porque a Madeira é uma região insular, o abastecimento energético é mais problemático e tem sobrecustos importantes, causados pelo transporte marítimo e pela pequena dimensão do mercado regional.

Um dos mais importantes consumidores de energia da Madeira é o sector dos transportes terrestres. É actualmente responsável por cerca de 40% da procura de energia final na Madeira, grande parte da qual é consumida no Funchal.

Tanto de um ponto de vista macro, como micro-económico, a poupança de energia ao nível dos transportes, sobretudo particulares, é do maior interesse para a Madeira em geral e para o Funchal em particular. Assim, a política regional e local, tendo em vista um desenvolvimento sustentável, privilegia a poupança de energia no sector dos transportes.

O consumo de energia no sector dos transportes terrestres no Funchal constitui um indicador chave para a avaliação dos diferentes cenários de desenvolvimento e para a tomada de decisão relativamente às opções de ocupação do solo e planeamento energético. Consequentemente, torna-se necessário possuir instrumentos adequados, capazes de avaliar o consumo e a eficiência energética, nas diferentes opções ligadas ao sector dos transportes e mobilidade, permitindo também a simulação de cenários alternativos.

O consumo de energia é também um importante indicador económico e, consequentemente, um argumento de peso para os responsáveis pela tomada de decisão, aquando da adopção de medidas para reduzir os volumes de tráfego no centro da cidade. Para além dos benefícios para o ambiente e qualidade de vida, o impacte económico associado é também determinante para a tomada de decisão.

8.4. Cálculo do Consumo de Energia

A fim de calcular o consumo de energia na rede viária da área em estudo no Funchal, e atendendo a que as medições directas não são viáveis, o método mais adequado encontrado foi o de recorrer a um modelo de energia, tomando em consideração as características mais relevantes da rede viária e do tráfego. A verificação dos cálculos será feita, contudo, pela sua comparação com as informações existentes acerca do consumo de gasóleo e de gasolina nos transportes terrestres da Região.

Espera-se obter, com este modelo, resultados aceitáveis, sem necessidades massivas de informação, o que tornaria o modelo difícil e dispendioso. O cálculo rua a rua constitui a abordagem mais adequada, por forma a se obter uma simulação flexível para várias situações e para a produção de diferentes cenários. Os dados necessários a este modelo são aproximadamente os mesmos que para o cálculo de emissões, qualidade do ar e ruído.

Concluiu-se que, no Funchal, sete categorias de veículos caracterizariam satisfatoriamente, em termos de consumo de energia, o parque automóvel em circulação na cidade. Para este número de categorias, torna-se viável realizar contagens de tráfego e estimativas aceitáveis em cada segmento de rua da área em estudo. Se o número fosse superior, tornar-se-ia difícil recolher todos os dados necessários e os resultados não seriam significativamente melhorados.

As categorias são:

- 1) Ligeiros a gasolina com chumbo
- 2) Ligeiros a gasolina sem chumbo
- 3) Ligeiros Diesel de passageiros
- 4) Ligeiros Diesel de mercadorias
- 5) Autocarros (HF)

- 6) Pesados de mercadorias - 10 t
- 7) Pesados de mercadorias - 26 t

O consumo de energia dos *Ligeiros a gasolina com chumbo* e *Ligeiros a gasolina sem chumbo* é praticamente o mesmo. Foram consideradas as duas categorias em vez de uma única, a fim de se obter o consumo de cada tipo de combustível.

8.4.1. Condições de Tráfego no Funchal

Os dados relativos aos fluxos foram obtidos através de contagens de tráfego. Estas contagens foram realizadas em dias úteis, das 7 às 20 horas, durante períodos de 15 minutos. Foi aplicado um factor correctivo de 1,15 para determinar os volumes de tráfego em 24 horas.

Devido a escassez de recursos, as contagens de tráfego foram feitas só para dois grupos de veículos: carros ligeiros (*Ligeiros a gasolina com chumbo*; *Ligeiros a gasolina sem chumbo*; *Ligeiros Diesel de passageiros*; e *Ligeiros Diesel de mercadorias*) e camiões (*Pesados de mercadorias - 10 t*; e *Pesados de mercadorias - 26 t*). As informações relativas ao número de autocarros foram obtidas das companhias de transportes públicos que operam no Funchal.

É muito difícil através da observação directa na rua, durante as contagens de tráfego, distinguir, por entre os automóveis ligeiros, os que utilizam gasóleo dos que utilizam gasolina com ou sem chumbo. A fim de determinar o número de automóveis em cada categoria (*Ligeiros a gasolina com chumbo* e *Ligeiros a gasolina sem chumbo*; *Ligeiros Diesel de passageiros*; e *Ligeiros Diesel de mercadorias*), foram recolhidas informações acerca do parque automóvel do Funchal, permitindo deste modo a estimativa de quantos veículos em cada categoria circulam na rede viária. Para além disso, para o cálculo do número de automóveis a gasolina que utilizam gasolina com chumbo e os que utilizam gasolina sem chumbo, foram recolhidos dados acerca da comercialização de gasolina na Madeira.

As informações recolhidas permitiram estimar a composição do parque automóvel no Funchal. Admitindo uma utilização proporcional do parque automóvel, determinou-se que o fluxo de tráfego de automóveis ligeiros é constituído por: 61,7% de *Ligeiros a gasolina com chumbo*; 20,6% de *Ligeiros a gasolina sem chumbo*; 8,1% de *Ligeiros Diesel de passageiros*; e 9,6% de *Ligeiros Diesel de mercadorias*. Relativamente aos camiões, concluiu-se que apenas 10% dos camiões que fazem uso das ruas principais da rede viária em estudo são de 26 t. Na maioria das ruas do centro da cidade não é permitida a circulação de camiões e autocarros.

A média da velocidade do tráfego constitui outro parâmetro importante. A velocidade média na área em estudo é praticamente a mesma na maioria dos segmentos de rua, devido às características físicas da cidade. O resultado da medição da velocidade média da circulação no centro da cidade em condições normais de tráfego é de cerca de 15 km/h.

8.4.2. Características da Rede Viária no Funchal

O primeiro passo para a caracterização física foi a definição da área de estudo e a identificação de todos os segmentos de rua. Os segmentos são limitados por nós e um nó corresponde a uma intersecção ou à mudança de uma característica relevante da rua.

Os parâmetros físicos relevantes para calcular o consumo de energia são o comprimento e a inclinação de cada segmento de rua. O comprimento foi obtido imediatamente do GIS. A inclinação média podia ser calculada através da informação disponibilizada no GIS. Contudo, quando comparada com o comprimento dos segmentos, a distância entre as curvas de nível apresentadas no GIS era demasiado elevada, para que tivesse uma precisão aceitável. A inclinação foi medida nas principais ruas da rede viária. Noutras ruas, a inclinação foi determinada através das curvas de nível de um mapa à escala 1:2000.

8.4.3. Implementação do Modelo de Energia

A fim de calcular o consumo específico e total de energia em cada segmento da rede viária, desenvolveu-se um modelo baseado, essencialmente, em volumes de tráfego, categorias de veículos, velocidade média e características físicas das ruas (comprimento, inclinação).

Os factores específicos de consumo de energia para cada categoria de veículos basearam-se em fontes diversas: literatura técnica (especialmente o relatório “Abgas — Emissionsfaktoren von PKW in der Bundesrepublik Deutschland”); modelos existentes; e medições no caso dos autocarros no Funchal. Recorrendo a uma interpolação polinomial, o factor de consumo específico de energia, por metro, por veículo, $e(i)$ [kJ/(m.veículo)], pode ser dado através das fórmulas seguintes, para cada categoria, dependendo da velocidade média S [km/h] do veículo e da inclinação média P [%] do segmento de rua:

1) Ligeiros a gasolina com chumbo:

$$e(1) = S^2/666,7 - 0,140 * S + 5,36 + 0,095 * P$$

2) Ligeiros a gasolina sem chumbo:

$$e(2) = S^2/666,7 - 0,140 * S + 5,36 + 0,095 * P$$

3) Ligeiros Diesel de passageiros:

$$e(3) = -S^3/30000 + 0,0045 * S^2 - 0,219 * S + 5,99 + 0,122 * P$$

4) Ligeiros Diesel de mercadorias:

$$e(4) = -S^3/6000 + 0,0185 * S^2 - 0,706 * S + 12,49 + 0,181 * P$$

5) Autocarros (HF):

$$e(5) = -0,0009 * S^3 + 0,1045 * S^2 - 4,178 * S + 69,59 + 1,274 * P$$

6) Pesados de mercadorias - 10 t:

$$e(6) = -S^3/7500 + 0,0165 * S^2 - 0,757 * S + 20,59 + 0,686 * P$$

7) Pesados de mercadorias - 26 t:

$$e(7) = -0,0015 * S^3 + 0,1425 * S^2 - 4,962 * S + 86,44 + 1,765 * P$$

Os factores formulados foram comparados com outros factores disponíveis em diferentes fontes e verificados, numa forma aproximada, com valores do consumo médio de energia fornecidos pelos fabricantes dos veículos mais comuns em circulação no Funchal.

A fim de calcular o consumo diário de energia de cada categoria, num dado segmento de rua, foi necessário multiplicar este factor $e(i)$ [kJ/(m.veículo)] pelo número de veículos por dia $N(i)$ [veículos/dia], e pelo comprimento do segmento de rua L [m]:

$$E(i) = e(i) * N(i) * L \text{ [kJ/dia]}$$

O consumo total de energia no segmento de rua equivale à soma de todas as categorias:

$$E = \sum E(i) \text{ [kJ/dia]}$$

O consumo total de energia na rede viária em estudo equivale à soma de todos os segmentos de rua:

$$E_{total} = \sum E \text{ [kJ/dia]}$$

A formulação desenvolvida foi implementada numa aplicação no GIS a fim de calcular o consumo de energia, baseando-se nos dados disponíveis acerca da rede viária e da circulação do tráfego. O objectivo deste modelo é o de calcular o consumo de energia do tráfego na área de estudo e de simular as possíveis alterações resultantes de medidas que influenciam a circulação de tráfego.

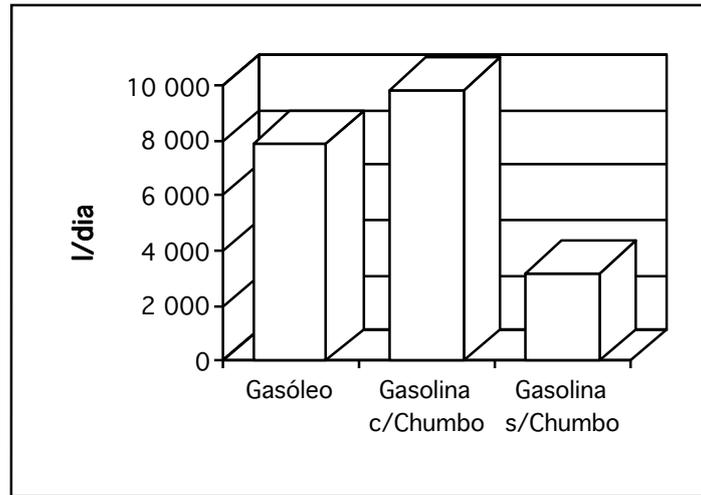
Através da manipulação dos resultados, foi possível obter alguns indicadores importantes, tais como a distribuição do consumo de energia por categoria ou o consumo de energia numa dada área. O acesso a mais dados possibilita o cálculo de outros indicadores, tais como o consumo de energia por passageiro transportado em cada modo de transporte (autocarro, táxi, viatura particular).

8.4.4. Resultados do Modelo de Energia

Os resultados obtidos através dos cálculos foram inseridos numa base de dados. Utilizando o consumo específico de energia (kJ/m) para cada segmento de rua torna-se possível produzir mapas em ArcView. Para fazer os mapas, o indicador relevante é o consumo específico de energia por unidade de comprimento, que exprime a intensidade do consumo de energia. O consumo total de energia em cada segmento é fundamental para calcular o consumo total numa rua ou numa dada zona.

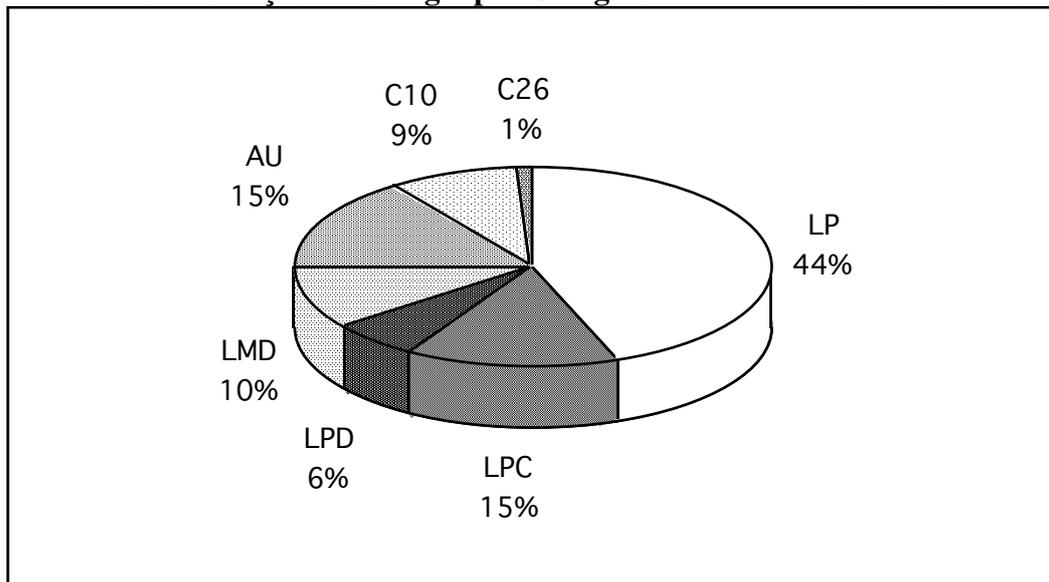
O consumo total de energia na rede viária em estudo, onde foram possíveis as contagens de tráfego, é de 652 GJ/dia, correspondendo a 15,57 tep/dia (7 927 l/dia de gasóleo; 9 862 l/dia de gasolina com chumbo; e 3 205 l/dia de gasolina sem chumbo). Este consumo de energia corresponde a cerca de 10% do consumo de energia do sector de transportes terrestres na Madeira em 1991.

Consumo Diário de Combustível na Rede Viária de Estudo



A distribuição de energia por categoria na rede viária de estudo é apresentada na figura seguinte. Os veículos ligeiros a gasolina representam 61% do consumo de energia; os veículos ligeiros a gásóleo representam 16% e os autocarros 15%.

Distribuição de Energia por Categoria na Rede Viária de Estudo



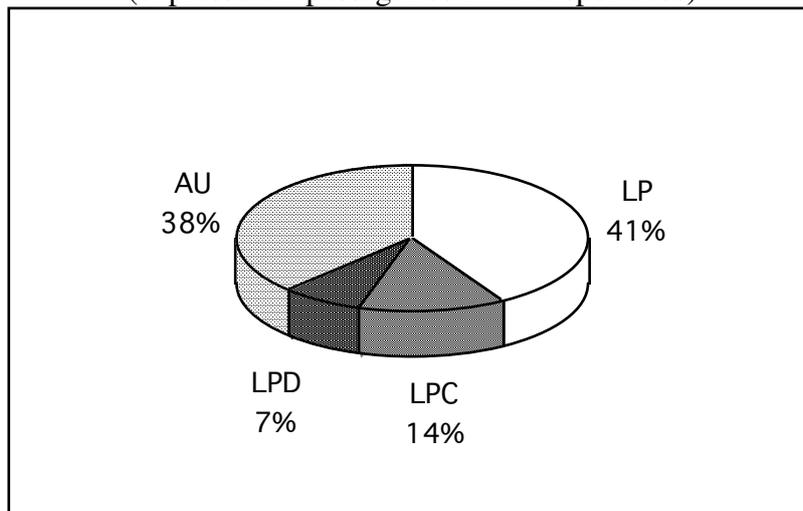
Em que:

- LP Ligeiros a gasolina com chumbo
- LPC Ligeiros a gasolina sem chumbo
- LPD Ligeiros Diesel de passageiros
- LMD Ligeiros Diesel de mercadorias
- AU Autocarros (HF)
- C10 Pesados de mercadorias - 10 t
- C26 Pesados de mercadorias - 26 t

O consumo de energia dos veículos privados a gasolina é quase quatro vezes superior ao consumo de energia dos autocarros. Os veículos ligeiros Diesel são geralmente, na sua grande maioria, para actividades profissionais e não podem ser substituídos por autocarros.

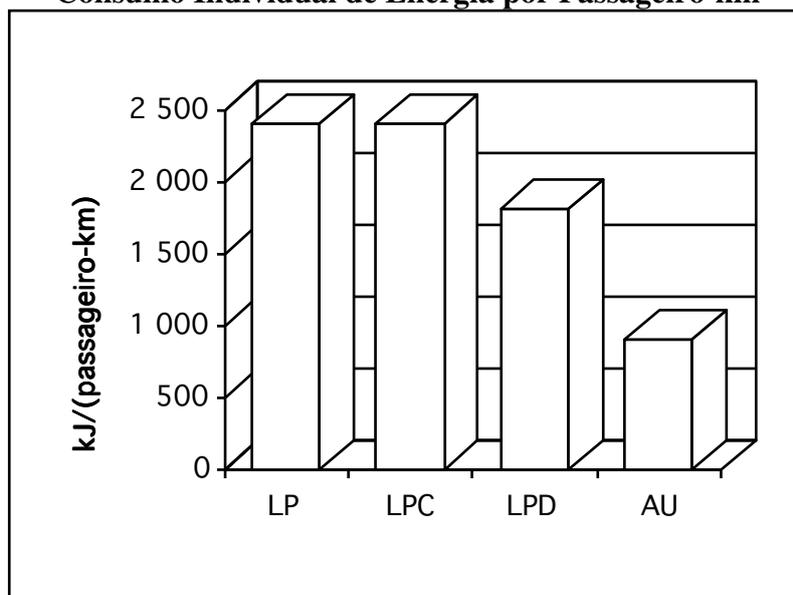
Pressupondo uma taxa de ocupação média de 1,5 passageiros por veículo para os *Ligeiros a gasolina com chumbo* (LP) e *Ligeiros a gasolina sem chumbo* (LPC); de 2,0 para os *Ligeiros Diesel de passageiros*; e de 30 para os *Autocarros*, a distribuição modal é:

Distribuição Modal na Rede Viária de Estudo
(expresso em passageiros-km transportados)



O consumo de energia por passageiro-km transportado é apresentado na figura seguinte:

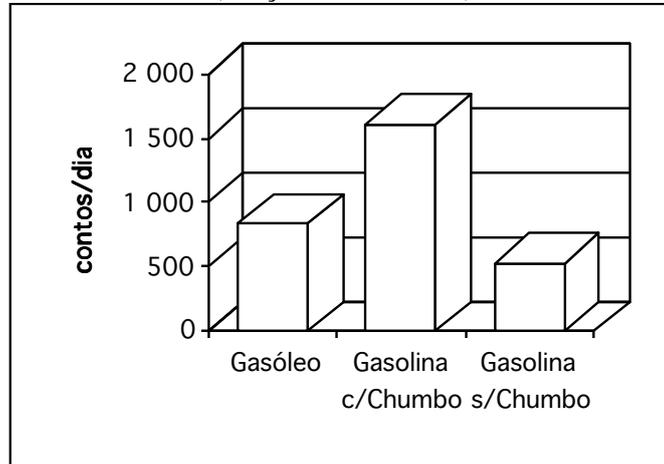
Consumo Individual de Energia por Passageiro-km



A eficiência energética é cerca de três vezes mais alta nos autocarros na rede viária em estudo, do que nos veículos particulares a gasolina.

De um ponto de vista económico, o custo total de energia para os proprietários dos veículos automóveis, na rede viária em estudo é de:

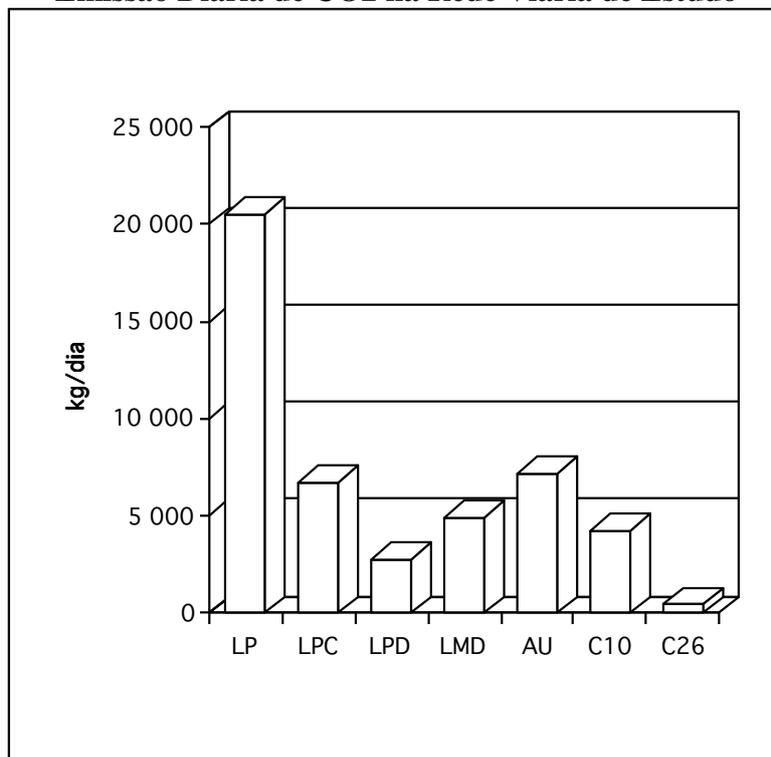
Custos Diários com Combustíveis na Rede Viária de Estudo
(Preços de mercado)



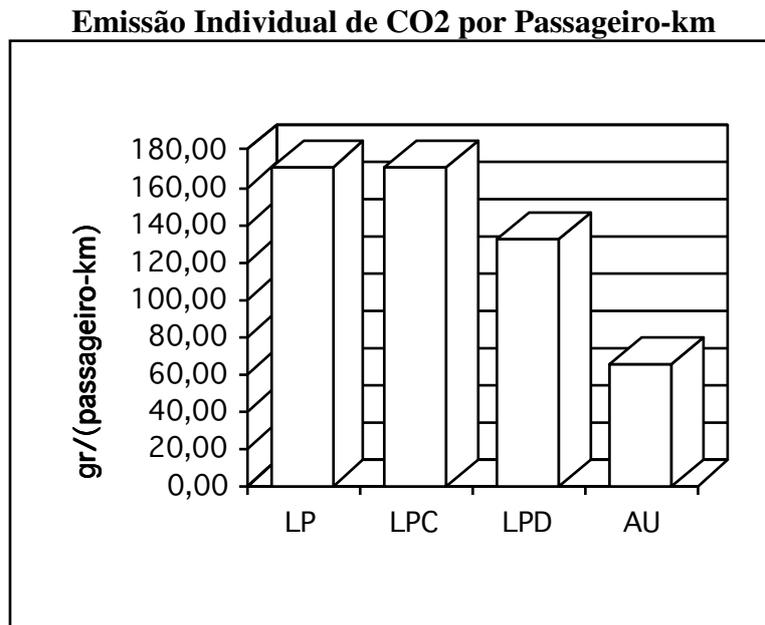
Esta conclusão é muito importante para a tomada de decisão e para conduzir a um novo esforço de promoção do transporte público na cidade, como medida para a redução do consumo de energia e do —pacte ambiental do tráfego.

O consumo de energia está relacionado com a emissão de CO₂, que pode ser calculada através de um balanço de massa, tendo em conta a composição do combustível:

Emissão Diária de CO₂ na Rede Viária de Estudo



A emissão de CO₂ por passageiro-km transportado é apresentada na figura seguinte:



8.5. Conclusões do Caso de Estudo

Este Caso de Estudo constituiu um teste à metodologia proposta neste documento. O seu objectivo principal foi demonstrar que o modelo de energia podia ser aplicado e adaptado a um caso concreto.

O consumo de energia na área de estudo corresponde, aproximadamente, a 10% da energia consumida nos transportes terrestres na Madeira, em 1991. Baseando-se no conhecimento das características do tráfego da Região, conclui-se que este resultado é satisfatório. Não há outro modo de confirmar se este resultado é aceitável ou não, pois as medições no campo não são praticáveis.

Dependendo dos dados disponíveis, muitos outros indicadores podem ser produzidos, por forma a sublinhar as características relevantes necessárias à comparação de diferentes medidas ou cenários e para ajudar a tomada de decisão.

Em termos gerais, esta metodologia constitui um instrumento útil ao planeamento sustentável de uma cidade e fornece elementos válidos, os quais permitem a análise do consumo de energia e do seu impacte sobre a economia e sobre o ambiente.

Bibliografia

- Abgas — Emissionsfaktoren von PKW in der Bundesrepublik Deutschland, UBA, 1993
- An Energy Policy for the European Union — White Paper of the European Commission, EC-DGXVII, 1996
- Energy and the Urban Environment Strategy for a Major Urban Centre, Newcastle upon Tyne City Council, 1992
- Fifth Action Programme for Sustainable Development, EC-DGXI, 1993
- Individual and Public Transportation — Emissions and Energy Consumption Models (RE 91-5), Technical University of Denmark, 1992
- Leicester Energy Strategy
- Plano Energético da Região Autónoma da Madeira, CEEETA/NIPERAM, 1992
- Transports, Energy and Quality of Life in Funchal, RAM/EC-DGXVII, 1993

Equivalências de Unidades

Unidades:

1 tep	10 ⁷ [kcal]
1 BTU	0,252 [kcal]
1 GWh	86 [tep]
1 k tep	41,86 [TJ]
1 TJ	23,889 [tep]

Combustíveis:

	[tep/t]	[GJ/t]
Propano e butano	1,140	47,7
Gasolinas	1,073	44,9
Gasóleo	1,045	43,7

Densidade de Combustíveis:

	[t/m ³]
Gasolina com chumbo	0,750
Gasolina sem chumbo	0,760
Gasóleo	0,845