



UNIVERSIDADE DOS AÇORES
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E GESTÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS EMPRESARIAIS

**Eficiência Energética – Uma Aplicação do
Postulado de Khazzoom-Brookes ao Sector
Automóvel Português**

Fernando José Fagundes Matos

ORIENTADOR: Professor Doutor Francisco José Ferreira Silva

PONTA DELGADA

Setembro 2008

Resumo

Em consequência do elevado peso do custo do combustível na estrutura de encargos das empresas de transporte, a redução dos custos de operação através do aumento da eficiência energética das viaturas ou eficiência operacional da operação, provoca uma alteração do custo relativo do transporte rodoviário de mercadorias. Tal facto pode aumentar a procura deste tipo de serviço. Assim, o resultado final será um aumento do consumo de combustível em que parte da poupança energética obtida através do aumento da eficiência pode ser assim anulada.

A existência de um "efeito ricochete" neste sector em particular é determinante na definição de políticas energéticas nacionais na medida em que no ano 2006 o transporte rodoviário de mercadorias foi responsável pelo consumo de 872 milhões de litros de gasóleo em Portugal.

Analisou-se o sector do transporte rodoviário de mercadorias em Portugal no período 1987-2006. Comprovou-se que as melhorias na eficiência energética não provocam o chamado efeito ricochete mas confirmou-se a existência de um efeito directo entre 1,2% e 24,1%. Demonstrou-se também que as empresas transportadores estão mais inclinadas para adoptar melhorias operacionais, como forma de melhorar a eficiência, do que melhorias tecnológicas.

Abstract

Because of the large portion of total operating costs of transportation companies going towards energy, a reduction of such operating costs brought about by an increase in fleet fuel efficiency or an increase in operating efficiency results in a change to the relative cost of road freight transportation. This fact could result in an increase in the demand for such services. If this is true, the result would be an increase in total fuel consumption so that part of the energy savings obtained through the increased energy efficiency would be lost.

The existence of a "Rebound Effect" is especially important in this sector and is crucial for the definition of a national energy policy. In 2006 road freight transport was responsible for the consumption of 872 million litres of diesel fuel in Portugal.

The road freight transport sector was studied in Portugal between the years of 1987 and 2006. It was found that increased energy efficiency did not cause a rebound effect but did cause a total direct rebound effect between 1,2% and 24,1%. It was also found that fleet operators are more inclined to adopt operational efficiencies than technological fuel efficiencies as a means of increasing total operating efficiency.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABELAS	v
INTRODUÇÃO	1
I. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1. Perspectiva Histórica	4
1.1. The Coal Question – Jevons	4
1.2. Khazzoom e o Efeito Directo	5
2. Efeito Directo – Estudos Empírico	12
2.1. Definição	12
2.2. Estimação	14
2.3. Forma Funcional do Modelo	26
2.4. Fontes de Enviesamento da Estimativa	28
3. Efeito Indirecto – Estudos Empíricos	29
3.1. Definição	29
3.2. Modelos de Equilíbrio Geral	31
3.3. Energia, Produtividade e Crescimento Económico	32
II. MODELO TEÓRICO	35
1. Enquadramento Conceptual	35
2. Definição do Sector do Transporte Rodoviário de Mercadorias	36
2.1. Factores Que Influenciam a Procura do Transporte Rodoviário	36
2.2. Estrutura de Custos da Operação	40
3. Modelo Teórico – Transporte Rodoviário de Mercadorias	41
III. ANÁLISE EMPÍRICA	44
1. Definição das Variáveis	44
1.1. Preço por Tonelada-Quilómetro	44
1.2. Produto Interno Bruto Real	46
1.3. Competitividade do Transporte Terrestre	46
1.4. Estimação de Parâmetros	47
2. Estimação Pelos Mínimos Quadrados Simples	48
2.1. Análise à Qualidade do Modelo	49
2.2. Verificação da Autocorrelação	50

2.3. Exogeneidade da Variável Preço	54
3. Estimação Pelos Mínimos Quadrados de Duas Fases	58
3.1. Escolha da Variável Instrumental	58
3.2. Estimação da Regressão	59
3.3. Análise à Qualidade do Modelo	60
3.4. Verificação de Autocorrelação	61
4. Escolha do Modelo	63
IV. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS	65
1. Modelo Empírico	65
2. Elasticidades	66
3. Significado Económico	67
V. CONCLUSÕES	70
BIBLIOGRAFIA	72
ANEXOS	77
Derivação da Definição do Efeito Directo	78
Derivação Definição 1	78
Derivação Definição 2	79
Derivação Definição 3	79
Método de Estimação Mínimos Quadrados Simples	80
Método de Estimação Mínimos Quadrados Duas Fases	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estimação Efeito Directo	14
Tabela 2 – Resumo de Resultados de Estimação	66
Tabela 3 – Estimação de Coeficientes para a Procura de Toneladas- Quilómetros	80
Tabela 4 – Regressão dos Erros	81
Tabela 5 – Teste Breusch-Godfrey	82
Tabela 6 – Teste de Hausman	83
Tabela 7 – Teste de Causalidade de Granger	85
Tabela 8 – Estimação de Coeficientes para a Procura de Toneladas- Quilómetros	87
Tabela 9 – Escolha da Variável Instrumental	88
Tabela 10 – Regressão dos Erros	89
Tabela 11 – Teste Breusch-Godfrey	90

Introdução

A relação entre o consumo de energia e o desenvolvimento económico é indiscutível. Desde a extracção de matérias-primas até ao transporte do bem final ao consumidor, a energia serve como um recurso essencial que permite aos agentes económicos beneficiar de todas as vantagens de um sistema económico globalizado e eficiente. Neste sentido a sua utilização racional é imprescindível de modo a garantir um crescimento económico sustentado.

Desde meados do Século XVIII, a energia tem sido um dos recursos mais cobiçados pelo Homem. A corrida frenética à aquisição, extracção, transporte e consumo – desde as formas mais básicas de energia à vanguarda das novas tecnologias de produção – torna a análise dos mecanismos de produção, e de consumo, cada vez mais importante para a salvaguarda do abastecimento futuro de um recurso com grande importância para a economia mundial.

Recentemente a crescente preocupação pelas questões ambientais tem levado muitos países a adoptar políticas destinadas à redução da emissão de gases de efeito estufa. Grande parte das emissões de dióxido de carbono provêm do consumo de combustíveis fósseis que fornecem energia aos sistemas económicos nacionais e internacionais. Uma das formas apontadas para reduzir o consumo de energia tem sido através do aumento da eficiência energética imposta pela criação de normas de emissão, que definem os níveis de eficiência energética permitidos. Esta política tem sido adoptada pela maioria dos países da União Europeia e em menor medida pelos Estados Unidos da América. Os ganhos de eficiência energética são discutidos num contexto em que tais ganhos são vistos não só como um meio para reduzir emissões de CO₂, como também para servir de “fonte” energética alternativa.

Contudo nos Estados Unidos da América, ao longo da última década, surgiram várias vozes críticas das políticas de criação de normas de emissão questionando a eficácia das políticas energéticas destinadas a aumentar a

eficiência da economia. O facto é que apesar dos incentivos à indústria e programas nacionais destinados a melhorar a produtividade da energia, o consumo deste recurso atinge níveis cada vez mais elevados. Fruto deste facto, levantaram-se sérias dúvidas quanto à sua utilização como instrumento para reduzir a dependência energética do país.

O potencial de poupança energético proveniente de uma melhoria da eficiência energética, é normalmente estimado com o recurso aos princípios básicos da física e modelos de engenharia. Porém, a poupança energética real proveniente de tais melhorias geralmente fica aquém das estimativas. Uma possível explicação deste fenómeno reside no facto de tais melhorias incentivarem o consumo de serviços energéticos de tal forma que parte ou todo do ganho obtido será compensado pelo aumento do consumo, o chamado "efeito ricochete".

A natureza e magnitude deste efeito tem sido alvo de forte debate entre economistas. Com o objectivo de reduzir a emissão de gases de efeito estufa, muitos Estados procuram hoje formas de melhorar a eficiência energética de todo o sistema económico. É geralmente aceite que tais melhorias reduzirão o consumo agregado de energia, quando comparado com um cenário em que tais melhorias não existissem.

O efeito ricochete – também conhecido pelo Postulado de Khazzoom-Brookes – pode ser definido como sendo a diferença entre a poupança projectada e a poupança actual de energia que resulta do aumento da eficiência energética. Este efeito pode ser analisado como tendo três componentes principais: efeitos directos, efeitos indirectos e efeitos dinâmicos de mercado. Os primeiros dois são facilmente estudados no plano microeconómico através de elasticidades procura preço e elasticidades cruzadas. Os efeitos dinâmicos de mercado são mais difíceis de analisar sendo necessário uma abordagem macroeconómica que tenha em conta a questão da variação dos preços do recursos e o impacto que esta variação tem na procura do recurso energético. É necessário também levar em conta o aumento de produtividade na economia em geral através da redução da intensidade energética.

O efeito ricochete, também conhecido pelo postulado de Khazzoom-Brookes, terá sido primeiro identificado por Len Brookes (1990) e por Daniel Khazzoom (1980). O postulado afirma que a redução do custo implícito da energia que resulta do aumento da eficiência energética dos serviços energéticos pode provocar um aumento do consumo de energia. O efeito directo consiste na poupança energética inicial que não é realizada devido à alteração dos padrões de consumo dos utilizadores destes serviços energéticos.

Tendo subjacente o acima referido, o presente trabalho propõe analisar, em Portugal, a existência de um efeito ricochete no transporte rodoviário de mercadorias que pode pôr em causa a validade das actuais políticas de promoção de eficiência energética dentro do sistema económico Português. A generalidade dos estudos empíricos destinados a averiguar a existência e quantificar a magnitude deste efeito, analisam o transporte rodoviário de passageiros em viaturas ligeiras. Neste contexto, ao verificar a falta de dados credíveis sobre o transporte pessoal em Portugal, optou-se por examinar o comportamento de empresas transportadoras cuja actividade é intensiva no consumo de energia.

A discussão em torno da eficiência energética mostra-se como uma excelente oportunidade para melhor compreender o processo de inovação tecnológica, permitindo evidenciar pontos importantes da relação entre energia e actividade económica em Portugal.

No que se refere à presente dissertação, interessa saber se as reduções nas quantidades de energia para fornecer uma unidade de serviço energético – as quais ocorrem no plano microeconómico e são viabilizadas por inovação tecnológica – são o instrumento adequado para reduzir o consumo de energia no plano macroeconómico.

I. Revisão Bibliográfica

1. *Perspectiva Histórica*

1.1. The Coal Question – Jevons

O tema do efeito ricochete tem sido fonte de um aceso debate quanto à eficácia da eficiência energética como instrumento para a redução do consumo de energia. O fenómeno terá sido primeiro abordado pelo economista Britânico William S. Jevons na sua publicação "*The Coal Question* (1865)". Neste período, o crescimento económico que terá dado origem à revolução industrial foi possível devido à relativa abundância de carvão utilizado como fonte de energia por excelência. Nesta altura a Inglaterra exportava grande parte do aço produzido para o resto da Europa. Para Jevons, este facto não se devia à melhor qualidade do aço Inglês – porque este continha impurezas proveniente da matéria-prima utilizada – mas sim ao seu baixo custo que só era possível devido ao baixo custo de extracção do carvão (Jevons 1865).

Em meados do século XIX, mediante a crescente dificuldade de extracção do carvão, essencial mas infinito, surgiu o debate sobre uma possível fonte alternativa energética sendo apontadas como possíveis opções a importação de carvão, a sua substituição por outra fonte energética ou a utilização mais eficiente deste recurso. Com o auxílio de métodos termodinâmicos foi possível verificar que em meados do Século XIX, a eficiência energética terá sido menos de 20%, tendo sido argumentado que o aproveitamento desta energia não utilizada poderá servir como "fonte" alternativa de energia primária. Para Jevons (1865) o uso eficiente desta fonte de energia traduzia-se num consumo superior uma vez que utilização eficiente deste recurso foi o factor principal que contribui para o seu consumo em massa.

O autor foi o primeiro a identificar o que virão a ser chamados o efeito directo e indirecto, utilizando o exemplo de fornalhas de aço. Se a quantidade de carvão utilizada numa fornalha for reduzido mantendo-se no entanto a produção, o lucro da actividade irá aumentar. Num contexto de aumento de rentabilidade, novo capital será atraído para a actividade com

um conseqüente aumento da produção e redução do preço do produto final – aço – acompanhado pelo aumento da procura. Eventualmente o maior número de fornalhas irá compensar o consumo médio de carvão inferior de cada uma sendo o resultado final o aumento do consumo agregado (Jevons 1865).

O progresso e crescimento de um sector individual, fomenta as actividades circundantes, o que leva directamente e indirectamente ao aumento do consumo de aço e de carvão. Quanto mais eficiente for o sistema económico, maior será o consumo de carvão (Jevons 1865).

1.2. Khazzoom e o Efeito Directo

Khazzoom (1980) terá sido o primeiro contemporâneo a estudar analiticamente uma das componentes do paradoxo proposto por Jevons (1865) quando este demonstrou que a longo prazo, a elasticidade da procura para diversos serviços energéticos - tais como o aquecimento de água e o aquecimento central - excedia a unidade (com sinal negativo), o que implica que a eficiência energética destes serviços poderá levar a um aumento agregado do consumo de energia. Contudo, as conclusões de Khazzoom (1980) concentraram-se apenas nas elasticidades sendo o paradoxo de Jevons completamente desvendado por Brookes (1990), que introduziu na análise a produtividade da energia e o seu efeito no resto da economia.

Keepin e Kats (1988), no seio de uma crescente preocupação pelas questões ambientais em finais da década de 80, publicaram uma série de artigos que retomaram o assunto da promoção de políticas de eficiência energética como forma de reduzir o consumo de energia e os seus efeitos ambientais nocivos.

Em 1988 retomou-se o debate, altura em que a eficiência energética terá sido apresentada como uma das derradeiras formas de reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Keepin e Kats (1988) apresentaram a eficiência energética como o factor tecnológico mais importante na determinação da

emissão de gases de efeito estufa. Para além de apenas ser uma teoria, apresentam a redução da intensidade energética mundial em 12% desde 1973 com prova desse facto. Afirmaram também que esta evolução aconteceu na ausência de políticas activas de promoção de eficiência o que demonstra uma pequena parte daquilo que será possível através de políticas concertadas em termos globais.

Os autores concluíram que, cada unidade monetária aplicada na promoção da eficiência energética terá um efeito entre 2,5 e 10 vezes superior a cada unidade monetária aplicado na substituição de energia com origem fóssil pela energia nuclear em termos de redução de emissões de dióxido de carbono. A promoção de políticas de eficiência constituía uma forma eficaz e pouco dispendiosa de enfrentar a questão do aquecimento global (Keepin e Kats 1988).

Em resposta a Keepin e Kats (1988), Brookes (1990) defendeu que as políticas de eficiência energética não podiam ser utilizadas isoladamente para resolver a questão do crescimento constante do consumo de energia com origem fóssil e conseqüentemente o aquecimento global. Brookes argumentou que a maioria dos defensores da eficiência energética descartaram o facto de não existir qualquer evidência empírica que podia comprovar que este tipo de política reduzisse o consumo energético. Brookes deu o exemplo da conversão de energia em trabalho útil que nos últimos cem anos teria aumentado por um factor de 10. No final deste período o consumo total e per capita de energia eram superiores ao do final do século anterior. Para Brookes este facto pode ser explicado através da redução do preço dos serviços energéticos que por si levaram a um aumento da procura dos mesmos serviços energéticos.

Brookes (1990) argumenta com base numa análise de dois cenários. Um em que a energia constitui uma restrição à actividade económica e outro em que não.

No caso da oferta de recursos energéticos tornar-se num obstáculo ao crescimento económico através do aumento do seu preço – como foi o caso

em 1973 e 1979 – o país consumidor tem duas opções. Ou não faz nada e aceita a redução da produção económica ou pode adaptar o sistema económico através da substituição de energia por capital e trabalho. Neste último caso (eficiência energética), o aumento do preço inicial aliado ao aumento da eficiência energética – que implica a redução do custo do serviço energético – estabelece um novo ponto de equilíbrio entre a procura e a oferta onde o consumo e o preço seriam superiores.

Brookes (1990) apoiado pelos trabalhos desenvolvidos por Schurr (1982) e Jorgenson (1984), afirma existir dois efeitos em simultâneo. Através da substituição de energia por trabalho e capital, existe um aumento na produtividade de todos os factores de produção e o aumento da produtividade de energia, tendo como resultado final a redução da intensidade energética no sistema económico. Brookes (1990) argumenta que a redução da intensidade energética utilizada como indício do aumento da eficiência energética por Keepin Kats (1988) está de facto associada a um aumento do consumo de energia. A substituição de energia por capital e trabalho tem um impacto tão elevado na produtividade destes dois factores, que o aumento da produtividade conjunta do trabalho e capital supera o crescimento da produtividade da energia. O resultado final seria o aumento do consumo de energia enquanto se assiste a uma redução da intensidade energética.

Em ambos os cenários apresentados por Brookes (1990) a eficiência energética provoca um consumo de energia superior aquela que se verificará na ausência das melhorias de eficiência.

Em outra análise efectuada por Brookes (1992) ao sector doméstico, o autor afirma ter existido uma correlação elevada entre o rendimento e o consumo energético. Os consumidores domésticos tendem a utilizar uma parte constante do seu rendimento em serviços energéticos para o consumo de combustível e electricidade. Neste caso a melhoria energética de alguns bens domésticos provoca um aumento da sua utilização, ou aquisição de novos bens consumidores de energia. O aumento do poder de compra em consequência da redução dos gastos com os bens de consumo actuais será

redireccionado para o consumo de bens e serviços que requerem o consumo de energia na sua produção e/ou utilização.

A preposição defendida por Brookes encontrou apoio num trabalho desenvolvido por Greenhalgh (1990). Para Greenhalgh (1990), os choques petrolíferos de 1971 e 1979 ditaram o fim da energia barata e demonstraram a necessidade de o estado ter um papel activo na procura de soluções energéticas. Greenhalgh (1990) afirma que a partir de 1971 foram introduzidos um conjunto de programas de promoção de eficiência energética com vista à estabilização do mercado doméstico. O desempenho destes programas terá sido avaliado com base na redução da intensidade energética do sistema económico. Para Greenhalgh (1990), foi uma falha de raciocínio pensar que uma alteração na intensidade energética permite avaliar a eficiência energética. Qualquer alteração neste indicador apenas reflecte a forma como a energia é utilizada (serviços versus indústria) independentemente da sua eficiência (Greenhalgh 1990).

À semelhança das conclusões de Schurr (1982) e Grubb (1990), Greenhalgh (1990) argumenta existir um vasto conjunto de factores que afectam o rácio do consumo de energia primária – PIB. Se a composição da estrutura económica passar de uma que seja baseada na indústria para uma de serviços, o aumento do PIB será mais provavelmente acompanhada por uma redução do consumo de energia. Por outro lado uma alteração da estrutura económica que passa de uma produção de produtos com um reduzido valor acrescentado para produtos com maior valor acrescentado, também poderá provocar uma alteração da intensidade energética sem que a eficiência energética contribua para a redução deste indicador (Greenhalgh 1990).

A par do tema da eficiência e o seu efeito no consumo agregado de energia, Greenhalgh (1990), à semelhança das conclusões retiradas por Brookes (1990) realça a relação entre a produtividade da energia e o seu efeito no bem estar da sociedade através do aumento do consumo de serviços energéticos. Novamente Greenhalgh (1990) refuta Keepin e Kats (1988), afirmando que os anteriores não se preocupam com os benefícios aos

consumidores mas apenas com o consumo de serviços energéticos. O incentivo para melhorar a eficiência energética está sempre presente, impulsionado pelo avanço tecnológico e o ganho económico. As tentativas de promover artificialmente a conservação de energia, cujo objectivo final seja a redução do consumo de energia, poderão apenas criar falhas no mercado energético tendo como consequência o aumento do consumo, o que traduz afinal a situação que os conservacionistas – Keepin e Kats – queriam evitar (Greenhalgh 1990).

A análise de cenários desenvolvida por Brookes (1990), suscitou reacções e respostas de diversos autores. O palco escolhido para este confronto de ideias foi a revista *Energy Policy* que no ano de 1990 publicou um conjunto de artigos sobre o tema.

Na sua resposta a Brookes (1990), Toke (1990) argumentou não existir qualquer evidência que a utilização eficiente de energia provoca um aumento do seu consumo. Este autor utilizou como referência o facto do consumo de energia primária na Inglaterra em 1988 ser 3% inferior do que em 1973 enquanto que o PIB tinha crescido 31% afirmando que este facto deve-se às políticas de eficiência energética. Toke (1990) contesta a afirmação de Brookes (1990) que defende a relação entre o rendimento familiar e os seus gastos em energia serem constantes. Toke (1990) argumenta utilizando um exemplo de um consumidor que adquire uma nova televisão. Se os níveis de eficiência obrigatórios impõem que um televisor consume apenas metade da electricidade, o consumidor não irá ver o dobro de televisão. O autor admite que a poupança do gasto energético será aplicado no consumo de outros bens e serviços mas apenas uma pequena parte do gasto destina-se a energia (Toke 1990).

Herring e Elliot (1990) expressaram as suas dúvidas quanto à importância dada por Brookes ao aumento da produtividade do capital e do trabalho que resulta da eficiência energética. Estes afirmam que embora o conceito de *total factor productivity* seja relevante quando o sector estudado for a indústria – sector em que a energia representa componente significativa dos custos de produção – devia ser realçado que o consumo industrial de

energia no Reino Unido representava apenas 28% do total de energia consumida. Este conceito não seria assim relevante quando o sector em análise não dedica uma *share* considerável dos seus recursos à energia (Herring e Elliot, 1990). Os autores argumentam que desde 1940, o consumo de energia pelo sector doméstico não sofreu qualquer alteração relevante, apesar do aumento considerável dos rendimentos familiares. Assim sendo, a proposição de Brookes (1990) que afirma que qualquer libertação de poder de compra proveniente de uma aumento de eficiência energética será aplicado num maior consumo dos serviços energéticos e provocará um aumento do consumo de energia não tem qualquer validade (Herring e Elliot, 1990).

O debate em torno da questão foi enriquecido pelos contributos – tanto a favor como contra – de Grubb (1990) que analisou os dois cenários propostos por Brookes (1990). Em relação ao primeiro cenário onde existe restrição à utilização de energia, Grubb (1990) concorda com Brookes (1990) na medida em que este afirma que as políticas de promoção de eficiência energética não irão levar à redução do consumo. Em relação ao segundo cenário, os dados históricos disponíveis até 1973 claramente confirmam as afirmações de Brookes (1990). Contudo, Grubb (1990) afirma que não seria sensato assumir que as tendências do passado irão reflectir-se no futuro. As décadas de 70 e 80 revelaram grandes variações no padrão de consumo de energia provocado pelo aumento dos preços dos combustíveis fósseis, existindo também algumas indicações de que determinados serviços energéticos estariam próximos da saturação. Estes dois factores aliados à alteração do padrão do desenvolvimento económico para bens com uma menor componente de energia e capital levantam certas dúvidas quanto à utilização do passado como referência.

Grubb (1990) escreve que Brookes (1990) cometeu o erro de confundir o processo de melhoria de eficiência energética natural que ocorre fruto de justificações económicas com as tentativas de minimizar o consumo de energia. Até 1973, o aumento da eficiência energética foi resultado da perseguição de objectivos para além da redução do consumo de energia; aumento da eficiência operacional com a introdução de processos

automatizados onde os custos da energia eram inferiores ao custo do trabalho (Grubb 1990).

Brookes responde às críticas colocadas em artigos publicados em 1992 e 1993 e defendeu sempre, como recursos aos modelos económicos, a sua convicção de que a promoção de políticas de eficiência energética representa uma ameaça ao próprio objectivo defendido pelos conservacionistas: a eficiência energética provoca uma redução do custo real do serviço energético o que implicará um aumento da procura destes serviços.

O tema do efeito ricochete foi durante as últimas duas décadas um assunto que tem gerado discórdia entre os proponentes desta teoria e os seus opositores. Enquanto que a existência deste fenómeno é consensual, a magnitude do seu efeito e a das suas componentes tem gerado um debate aceso sobre a eficácia ou não desta política com instrumento para reduzir o consumo energético.

Embora os economistas com maior proximidade ao sector da energia reconheceram que os efeitos directos e indirectos existem e que este facto poderá reduzir o potencial de poupança de políticas de promoção de eficiência energética, não existe consenso em relação ao efeito conjunto. Lovins, et al., (1988), e Schipper e Grubb (2000) argumentam que o efeito ricochete é de pequena importância devido à procura inelástica do serviço energético e devido à pequena parte que estes custos representam nos gastos totais. Outros sugerem que o seu efeito é suficientemente importante para anular por completo os ganhos iniciais provenientes da eficiência energética (Brookes 2000, Herring 2006).

2. Efeito Directo – Estudos Empírico

2.1. Definição

O efeito directo diz respeito a serviços energéticos individuais tais como o transporte automóvel de passageiros, o aquecimento de espaço, iluminação, etc., onde a variação do custo do serviço provoca uma alteração no comportamento do consumidor. Nestes casos uma melhor eficiência energética reduz o custo marginal de fornecimento do serviço energético. Por exemplo, após a compra de um automóvel mais eficiente os consumidores poderão optar por conduzir mais porque o custo por quilómetro é agora inferior. Assim o aumento do consumo do serviço irá compensar pelo menos em parte, a redução do consumo proporcionado pela melhoria da eficiência.

O efeito directo pode ser decomposto em: (1) o efeito de substituição onde o consumo do serviço energético agora mais barato substitui o consumo de outros bens e serviços e um (2) efeito rendimento onde o aumento de rendimento real resultado do aumento da eficiência provoca um aumento do consumo do serviço.

A magnitude do efeito directo, deve ser proporcional ao peso da energia no custo total do serviço energético. Além disso, quanto mais facilmente for comunicado estes custos aos consumidores maior será o efeito directo. No transporte automóvel pessoal por exemplo, o custo do combustível constitui uma grande parte do custo por quilómetro percorrido para além deste custo ser facilmente observado cada vez que o automobilista abastece. No caso de alguns equipamentos electrónicos, por exemplo um leitor de CD, não só o custo de electricidade constitui uma pequena parte do custo total de utilização do equipamento quando comparado com o custo de aquisição como também o custo da própria energia não é facilmente identificado uma vez que é comunicado no final de cada mês juntamente com os outros consumos.

Como já terá sido referido o efeito ricochete pode ser decomposto num efeito directo constituído por um efeito rendimento, um efeito substituição e um efeito indirecto constituído por energia implícita e um efeito secundário. Na generalidade, os estudos empíricos que se dedicam a quantificação do efeito ricochete abordam o tema do efeito directo uma vez que este é quantificado mais facilmente através da análise de dados secundários referentes à procura de um determinado serviço energético.

O efeito directo relaciona o serviço energético específico com a energia necessária para fornecer tal serviço. O aumento da eficiência energética irá reduzir o custo marginal de utilização o que deve provocar um aumento do seu consumo.

As estimativas do efeito directo variam consideravelmente consoante o serviço energético estudado, o período analisado e o modelo funcional aplicado. Em relação ao transporte automóvel – o serviço energético mais estudado – as estimativas variam entre os 3% e 87% sendo o intervalo que maior consenso gera entre os 10% e os 30%.

De longe o serviço energético mais analisado quanto à existência do efeito ricochete é o transporte automóvel pessoal. A grande maioria destes estudos dizem respeito aos Estados Unidos da América dada a relativa abundância de dados. Estes estudos variam consideravelmente em relação aos dados utilizados e às especificações empíricas do modelo. A maior parte deles utilizam dados agregados de modo a observar os efeitos deste fenómeno a longo prazo enquanto que os estudos de *household surveys* são utilizados para analisar o comportamento individual do consumidor a um nível mais micro.

Segue na próxima página um resumo dos trabalhos mais relevantes desenvolvidos nesta área e as métodos de estimação utilizados por cada autor.

Tabela 1 – Estimação Efeito Directo

Autor	Efeito Directo	País	Período	Forma Funcional	Método de Estimação
Blair et al. (1984)	25%-40%	EUA	1967-76	Lin	MQS e MQG
Mayo e Mathis (1988)	26%	EUA	1958-84	Lin - 2 Log	MQ3F
Gateley (1992)	9%	EUA	1966-88	2 Log	MQS
Greene (1992)	5%-15%	EUA	1957-89	Log - Lin	MQS
Jones (1993)	30%	EUA	1957-89	Log - Lin	MQS
Schimek (1996)	21%-29%	EUA	N/D	2 Log	MQS
Wheaton (1982)	6%	25 Países OCDE	1972	2 Log	MQS

Embora o presente trabalho pretende quantificar o efeito directo no transporte rodoviário de mercadorias, o transporte automóvel pessoal tem muitos aspectos em comum. Tanto a forma funcional como as variáveis utilizadas são similares por isso será dada maior ênfase aos estudos empíricos sobre o transporte automóvel pessoal.

2.2. Estimação

A) Séries Cronológicas

Um dos primeiros estudos elaborados com o objectivo de estudar o efeito directo no sector automóvel pessoal deve-se a Blair, et al., (1984). Estes autores estudaram o efeito directo utilizando uma série temporal com periodicidade mensal no estado Americano da Florida entre 1948 e 1976. Blair, et al., (1984) estimou o efeito directo através de um modelo estático com um total de duas equações: (1) quilómetros percorridos em função do custo por quilometro, rendimento e população; (2) eficiência automóvel em função do custo do combustível e rendimento. Este estudo terá sido um dos primeiros a incluir na análise o custo implícito da eficiência energética através da sua relação com o custo do combustível e o rendimento. Essencialmente, estas duas variáveis quantificavam o incentivo ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes. Os dados utilizados revelaram um efeito directo entre 25% e 40%, dependendo do método de estimação utilizado, mínimos quadrados simples ou mínimos quadrados generalizados. Este estudo apresentou pouca variação da variável

independente. Os estudos mais recentes que incorporam o período 1979-1982 beneficiam de uma maior variabilidade da variável independente.

Mayo e Mathis (1988) estudaram o período entre 1958 e 1984, que inclui as variações significativas dos preços dos combustíveis que resultaram dos dois choques petrolíferos de 1973 e 1979. Apuraram um valor de 22% para o efeito directo de curto prazo e 26% para o efeito directo de longo prazo.

Em outro estudo elaborado por Gately (1990), o efeito directo encontrado foi de 9% tanto para o curto prazo como para o longo prazo. Uma característica interessante deste estudo reside no facto de ter sido substituído a população na função de quilómetros percorridos pelo número de condutores. O rácio entre estes dois valores varia significativamente ao longo do tempo pelo que o último deve ser mais relevante para determinar a posse ou não de viatura e a sua utilização.

Um dos estudos elaborados com maior rigor, com o intuito de estudar o efeito directo do efeito ricochete, foi elaborado por Greene (1992). Greene utilizou dados para o período 1957-1989 que abrangeram todo o território Americano e estimou um efeito directo entre 5% e 15% para o curto e longo prazo. Ao corrigir a autocorrelação presente no modelo inicial o coeficiente da variável desfasada deixou de ser significativa. Com este facto, o efeito directo de longo prazo não é superior ao efeito directo de curto prazo. Greene (1992) argumentou que estudos anteriores estimaram um efeito directo de longo prazo superior uma vez que não corrigiram para a autocorrelação. Greene (1992) justifica a ausência de efeitos directos de longo prazo ao notar que o custo do combustível representa menos de 10% de todos os custos do serviço a longo prazo. Se esta afirmação for correcta, conclusões similares podem ser retiradas para outros tipos de serviços energéticos, onde a energia representa uma parte ainda inferior dos custos totais de longo prazo.

Uma particularidade interessante do estudo de Greene (1992) reside no facto do efeito directo ser de 5,9% no período 1978-89 mas 27,4% no

período 1966-77. Estes valores sugerem que o efeito directo decresce com o rendimento de acordo com a teoria económica.

Jones (1993) efectuou uma série de estimações com os mesmos dados utilizados por Greene (1992) confirmando a validade estatística do modelo de Greene. Ao reanalisar os dados, Jones (1993) afirmou que outros tipos de modelos, como por exemplo os de variável dependente desfasada, parecem ser consistentes com os dados. Estes modelos fornecem um efeito directo de longo prazo que ronda os 30%. Uma das desvantagens dos modelos dinâmicos está no facto de estimarem a elasticidade procura rendimento da distância percorrida próximo de zero, o que parece pouco plausível dado a teoria económica.

Num estudo mais recente, Schimek (1996), ao utilizar dados agregados para os Estados Unidos estima a magnitude dos efeitos directos através do recurso a um sistema de três equações. O efeito directo de curto prazo fixou-se entre os 5% e os 7% sendo o efeito directo de longo prazo muito superior entre os 21% e os 29%.

Através da análise de séries cronológicas estima-se que o efeito directo do efeito ricochete para as viaturas pessoais esteja entre os 5% e os 30%. Embora não exista consenso sobre o modelo funcional a adoptar, especialmente em relação ao tratamento adequado da autocorrelação, a insuficiência de dados não permite afirmar que um ou outro método seja o mais adequado. Convém frisar que todos os estudos existentes dizem respeito ao mercado Americano e utilizam dados relativamente antigos. Dado esse facto não é possível afirmar que a elasticidade procura preço seja diferente entre países ou que tem reduzido ao longo dos anos.

B) Dados de Painei

Algumas das limitações técnicas das séries cronológicas foram ultrapassadas com a utilização de dados de painei. Estes dados contêm mais pontos individuais pelo que na teoria, fornecem estimativas de

parâmetros mais eficientes. Os estudos que utilizam dados de painel são mais recentes devido à disponibilidade de dados.

No seu estudo Orasch e Wirl (1997) utilizaram dados de painel para três países; França, Itália e Reino Unido. As estimativas para o efeito directo de curto prazo variaram entre os 10% para o Reino Unido e os 20% para a França e Itália. Quanto ao efeito directo de longo prazo, este variou entre os 27% para o Reino Unido e os 30% para a França e Itália.

O primeiro estudo efectuado ao conjunto dos países da OCDE foi elaborado por Johansson e Schipper (1997). Este estudo apresenta um nível de rigor na sua elaboração notável por duas razões. Primeiro, os autores prestam um cuidado especial à qualidade dos dados de cada país ao desagregar os dados da procura em gasolina, gasóleo, gás petrolífero liquefeito e gás natural. Este facto torna o estudo menos vulnerável ao erro de medição, uma vez que isola a fonte de energia principal das viaturas pessoais. Segundo, utilizaram vários métodos de estimação incluindo os mínimos quadrados simples, mínimos quadrados generalizados e os mínimos quadrados de duas fases. Quanto à estimação do efeito directo, se este for quantificado em função da distância percorrida da frota automóvel, apresenta um valor de 30% comparado com o caso de ser quantificado em função da distância percorrida por viatura em que apresenta um valor de 20%.

Haughton e Sakar (1996), utilizaram dados ao nível de cada estado Americano para o período entre 1972 e 1991. Estimaram equações separadas para a eficiência da frota automóvel e quilómetros percorridos por condutor, com o consumo de combustível a ser calculado através do produto destas duas variáveis e o número de condutores. Estes autores estimaram uma equação dinâmica para a eficiência média da frota automóvel que inclui uma variável que representa o preço real mais elevado de combustível nos anos que procederem a observação. Esta formulação implica que um preço elevado de combustível induz melhorias na eficiência energética que se mantém nos anos subsequentes. Observaram que o preço actual do combustível não afecta a eficiência energética a não ser que

seja superior ao último preço máximo verificado. Este facto demonstra a assimetria de preço da procura de energia. Haughton e Sakar (1996) estimaram um efeito directo de curto prazo entre os 9% e os 12% e um efeito directo de longo prazo de 22%.

A tentativa mais recente para estimar o efeito directo foi por Small e Van Dender (2005). Estimaram que o efeito directo de curto prazo ronda os 4,5% enquanto que o efeito directo de longo prazo se aproxima dos 22%. Uma das conclusões mais relevantes deste estudo demonstra que um aumento de 10% do rendimento provoca uma redução do efeito directo de curto prazo em 0,58% conforme, dita a teoria económica. Esta conclusão torna-se relevante no que diz respeito à elaboração de políticas futuras porque se a políticas de conservação forem adoptadas com base em valores que não se verificarão no futuro, a política pode ser pouco eficaz ao tentar alcançar o seu objectivo. Dado este facto, o estudo mais aprofundado deste efeito – redução do efeito directo com o aumento do rendimento – poderá ter implicações relevantes.

C) Dados Desagregados

Outro conjunto de estudos tentou apurar a magnitude do efeito directo com o recurso a inquéritos efectuados às famílias. Embora menos comum, este método permite evitar algumas das dificuldades na quantificação dos dados agregados (Schipper, et al., 1993) e tem o potencial de fornecer estimativas rigorosas em relação às distâncias percorridas e ao consumo de combustível. Uma desvantagem na utilização deste método reside no facto de uma grande quantidade de informação ser difícil de tratar estatisticamente e a generalização ao ambiente nacional ser algo difícil, dadas as preferências específicas de cada grupo de consumidores. Este tipo de estudo normalmente apresenta uma variabilidade na estimação do efeito directo superior com diversos estudos a revelar valores para o efeito ricochete superiores a 50%.

O primeiro estudo a utilizar este tipo de informação desagregada foi elaborado por Goldberg (1996), que estimou um efeito directo entre os 0%

e os 22%, consoante for ou não ignorada a endogeneidade da variável eficiência energética.

Os restantes resultados deste método originaram estimativas do efeito directo de curto prazo de 49% (Puller e Greening 1999) e 87% (West 2004) e para o efeito directo de longo prazo de 23% (Greene 1999) e entre os 56% e os 66% (Frondel et al., 2007).

A grande variabilidade destes resultados sugere que qualquer conclusão obtida a partir de dados desagregados deve ser encarada com alguma cautela.

O transporte pessoal é uma das poucas áreas onde os estudos sobre o efeito directo do efeito ricochete permite retirar algumas conclusões quanto a magnitude deste efeito. Analisando o conjunto de estudos, o efeito directo deste serviço energético deve estar entre os 10% e os 30%. Contudo a relação entre o efeito directo e o nível de rendimento não está claro – embora os estudos de Small van Dender (2005) e Greene, et al., (1999) sugerisse que a relação é forte – dificuldades na quantificação de algumas variáveis e a limitação dos estudos ao mercado Americano não permite a sua generalização para outras realidades.

D) Outros Serviços Energéticos

A literatura estende-se, embora em menor quantidade, a outros serviços energéticos. Embora os métodos utilizados sejam semelhantes ao do transporte pessoal, a variabilidade das estimativas não permite avaliar com certeza a magnitude do efeito directo.

Uma área bem estudada no âmbito do efeito ricochete é o consumo doméstico. A seguir ao transporte automóvel pessoal, o consumo doméstico de energia é com certeza a área mais bem analisada no âmbito da economia da procura de energia.

O aquecimento doméstico nos países da OCDE representa cerca de 60% da energia consumida pelo sector doméstico o que torna a análise a este sistema energético relevante no contexto da redução do consumo energético.

O tema do efeito directo de serviços energéticos domésticos ao ser tratado por Schwarz e Taylor (1995), Schipper, et al., (1993), Hseuh e Gerner (1993) e Klein (1987,1988) resultaram em estimativas entre os 0,6% e os 58% no que diz respeito ao aquecimento do espaço. Estes estudos utilizaram diversas metodologias sendo a utilização de dados de painel mais comum e confirmam a existência de relações micro muito para além do transporte rodoviário.

E) Métodos de Estimação

O efeito directo do efeito ricochete é definido como o efeito na procura de um determinado serviço energético provocado pelo aumento da eficiência energética do sistema energético e a conseqüente redução do custo marginal do serviço. Este efeito pode ser analisado em duas ópticas, através de um efeito de substituição – o consumo de um serviço energético substitui o consumo de outros serviços energéticos – e um efeito rendimento – o aumento da eficiência que provoca um aumento do rendimento e um aumento do consumo do serviço.

Para todos os diversos tipos de serviços energéticos, existem duas metodologias básicas para a recolha e análise dos dados sobre o efeito ricochete. A primeira consiste em experiências formuladas para este fim em concreto que tentam quantificar a alteração da procura do serviço energético em função das alterações da eficiência energética. Contudo, a metodologia mais utilizada é, a utilização de fontes secundárias de informação onde são aplicadas técnicas econométricas adequadas para estimar cada uma das elasticidades que define o efeito directo.

A literatura econométrica relevante para o estudo do efeito directo é extremamente técnica e em alguns casos difíceis de compreender (Sorrel,

2007). Este facto deve-se à grande variedade de metodologias utilizadas e a falta de definições básicas de modo a identificar os conceitos relevantes. Estudos diferentes utilizam metodologias e definições diferentes, estimam o efeito através de vários métodos e apresentam os seus resultados de várias formas. Além disso, muitos dos estudos mais relevantes nem sequer fazem referência ao efeito ricochete uma vez que o objectivo de estudo de grande parte deles incide sobre outros temas.

Na generalidade, o efeito directo pode ser estimado através da elasticidade da procura de energia ou trabalho útil em relação às alterações de eficiência energética. Contudo, poucos estudos seguem esta metodologia, ou porque existe uma limitação dos dados, ou porque existe pouca variação da variável independente – eficiência energética – o que resulta numa grande variância do parâmetro estimado. Assim, muitos estudos utilizam a elasticidade da procura, como por exemplo a elasticidade de procura de quilómetros percorridos em relação ao custo por quilómetro. Dado que o preço do trabalho útil está dependente dos custos da energia e a eficiência energética, a variação da variável independente é muito superior. A validade desta metodologia está baseada no pressuposto de que os consumidores responderem da mesma forma a um decréscimo do preço da energia do que a um aumento da eficiência energética.

Também será possível estimar o efeito directo através do elasticidade procura preço da procura da energia não sendo assim necessário recolher informação da procura do trabalho útil. Este método assume que (1) os consumidores respondem da mesma forma a um decréscimo do custo de energia do que a um aumento da eficiência energética e (2) o preço da energia não afecta a eficiência energética. Ambos estes pressupostos não são prováveis.

Todas as metodologias de estimação implicam a quantificação do consumo do serviço energético. Esta quantificação é em muitos casos difícil o que explica em parte a ausência de um maior número de estudos sobre este tema em áreas que não os transportes.

No caso de existirem dados para o consumo de energia e a procura de trabalho útil, o efeito directo pode ser estimado. Em alternativa, a procura de trabalho útil pode ser estimado através de dados sobre o consumo e eficiência energética.

A quantificação do efeito directo poderá ser obtido através de uma de três definições:

Definição 1: Elasticidade Procura do Trabalho Útil em Relação à Eficiência Energética

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1 \quad (1)$$

Sendo S a procura do serviço energético, E a energia consumida pelo sistema e ε a eficiência do sistema energético podem-se escrever as seguintes relações:

$$S = \varepsilon E \quad (2)$$

$$E = S / \varepsilon \quad (3)$$

$$\eta_{\varepsilon}(S) = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} \quad (4)$$

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} \quad (5)$$

Substituindo a equação (3) na equação (5) e aplicando derivadas parciais obtemos a seguinte relação entre as duas elasticidades:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \frac{\partial \left(\frac{S}{\varepsilon} \right)}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{S/\varepsilon} \right) = \left(-S \frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\varepsilon^2}{S} \right) = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} - 1 \quad (6)$$

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1 \quad (7)$$

A equação (7) mostra que a relação entre a eficiência energética e o consumo de energia pode ser explicada pela elasticidade da procura do serviço energético em relação á eficiência energética. Para aplicar esta metodologia é necessário determinar quais os dados que relacionam a procura de trabalho útil (serviço energético) e a eficiência energética. O problema com a aplicação desta metodologia está na quantificação do nível de eficiência energética. Em relação à procura de trabalho útil, poderá ser utilizado uma proxy. Por exemplo, para o transporte automóvel pessoal seria o número de quilómetros percorridos, numa indústria, as horas de laboração (trabalho útil) poderão ser obtidos através das horas de laboração dos funcionários e no transporte rodoviário de mercadorias seriam as toneladas-quilómetro transportadas.

Esta metodologia utilizada por Berkhout, et al., (2000) mostra que a poupança real no consumo de energia apenas será igual à poupança estimada pelos modelos de engenharia (ou seja, que não existe efeito ricochete) quando a elasticidade for zero ($\eta_\epsilon(S)=0$). A existência de um efeito ricochete positivo implica que $\eta_\epsilon(S) > 0$ e $|\eta_\epsilon(E) < 1|$. Por exemplo o efeito directo positivo no transporte automóvel pessoal implica que as melhorias na eficiência dos automóveis provoca um aumento dos quilómetros percorridos e por isso a poupança energética real é inferior.

Se a procura do serviço energético for inelástico ($0 < \eta_\epsilon(S) < 1$), uma melhoria da eficiência energética deve reduzir o consumo de energia ($-1 < \eta_\epsilon(E) < 0$). Contudo se a procura de trabalho útil for elástica ($\eta_\epsilon(S) > 1$), uma melhoria da eficiência energética deve aumentar o consumo de energia. Este resultado constitui o chamado "ricochete".

Definição 2: Elasticidade Procura de Trabalho Útil em Relação ao Custo do Trabalho Útil

$$\eta_\epsilon(E) = -\eta_{p_s}(S) - 1 \tag{8}$$

Dado que $P_s = P_E / \varepsilon$, um aumento da eficiência energética, quando o preço da energia é constante, terá o mesmo efeito no custo do serviço energético do que uma redução do preço da energia quando a eficiência for constante. Assumindo estas condições, *ceteris paribus*, o efeito sobre o custo total deve ser simétrico. Se o rendimento e o preço dos outros inputs se mantiver constante podemos afirmar que a procura do serviços energético é somente função do preço da energia e da eficiência energética – $S = s(P_E) / \varepsilon$.

A procura de energia pode assim ser dada pelas expressões:

$$E = S(P_s) / \varepsilon \quad (9)$$

$$E = S(P_E / \varepsilon) / \varepsilon \quad (10)$$

Assumindo que P_E é exógeno podemos derivar esta equação em relação à eficiência energética e obter assim uma definição alternativa do efeito directo:

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} = \frac{\varepsilon}{E} \left[-\frac{S}{\varepsilon^2} + \frac{\partial S}{\partial P_s} \frac{\partial P_s}{\partial \varepsilon} \right] = \frac{\varepsilon}{E} \left[-\frac{S}{\varepsilon^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{P_E}{\varepsilon^2} \frac{\partial S}{\partial P_s} \right] \quad (11)$$

$$\eta_\varepsilon(E) = -\frac{S}{\varepsilon E} - \frac{P_E}{\varepsilon^2 E} \frac{\partial S}{\partial P_s} = -1 - \frac{P_s}{S} \frac{\partial S}{\partial P_s} \quad (12)$$

$$\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{P_s}(S) - 1 \quad (13)$$

Neste caso em concreto o simétrico da elasticidade da procura do trabalho útil ($\eta_{P_s}(S)$) está a ser utilizado como uma *proxy* para a elasticidade da eficiência da procura do trabalho útil ($\eta_\varepsilon(S)$) que é por si só a definição do efeito directo. Se o trabalho útil for um “bem” normal esperamos que $\eta_{P_s}(S) < 0$. Se por exemplo a elasticidade dos quilómetros percorridos (S) em relação ao custo por quilómetro (P_s) for estimada em 0,10 então a

elasticidade da procura de combustível em relação à eficiência seria de - 0,90. Para um aumento de 10% na eficiência energética de um automóvel seria de esperar uma redução de 9% no consumo de combustível, ou seja, a poupança real seria 10% inferior ao projectado por um modelo de engenharia.

Esta metodologia utilizada por Khazzoom (1980), Berkhout, et al., (2000) e Binswanger (2001) é normalmente preferida em relação à Definição 1. Para muitos serviços energéticos, a variável independente na Definição 1 (eficiência energética) varia pouco provocando uma variância elevada na estimação do efeito directo. Contudo as estimações do efeito directo com base na Definição 2 requerem medidas precisas do custo do serviço (P_s) que varia consoante o preço da energia base e a eficiência do sistema de conversão.

Definição 3: Elasticidade Procura de Trabalho Útil em Relação ao Custo da Energia

$$\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{P_E}(S) - 1 \quad (14)$$

Em muitos casos, a informação sobre a eficiência de um determinado sistema energético pode não estar disponível ou ser de pouca qualidade. Neste caso poderá ser utilizada a Definição 3 analisando a elasticidade da procura do trabalho útil em relação apenas ao preço da energia. Tal como a Definição 2, a Definição 3 assume que a reacção dos consumidores face a um aumento ou redução do preço da energia é igual. Neste caso concreto se a eficiência não for mantida constante ($\eta_{P_E}(S)|_\varepsilon$) esta definição assume implicitamente que a eficiência não é afectada pela alteração dos preços da energia ($\eta_{P_E}(\varepsilon) = 0$). Contudo se alterações no preço da energia provocarem alterações na eficiência energética, a utilização desta definição para apurar a magnitude do efeito directo pode ser enviesada uma vez que à alteração do preço do serviço energético não será directamente proporcional a

alteração do preço da energia. Esta definição fornece uma forma de estimar o efeito directo sem ter que observar directamente a variável eficiência. Os estudos empíricos que utilizam a definição 3 necessitam de dados fiáveis quanto à procura de trabalho útil.

As estimativas econométricas baseadas nas definições 2 e 3 são a fonte principal de estudos que tentam quantificar o efeito directo. Contudo ao utilizar qualquer um destes métodos é necessário ter em conta: (1) a correlação entre a eficiência energética e o custo de outros inputs nomeadamente o capital e (2) a endogeneidade da eficiência energética e a consequente necessidade de equações simultâneas ou variáveis instrumentais.

2.3. Forma Funcional do Modelo

Na literatura existente sobre a estimação do efeito directo é possível identificar vários tipos de modelos econométricos, desde os modelos simples aos modelos de variáveis discretas.

Modelo Simples

Muitos estudos empíricos utilizam uma única equação para a estimação da procura de trabalho útil ou energia.

$$S = f(P_E, Y, X_s) \quad (15)$$

A procura do serviço energético é explicada pelo preço da energia P_E , o rendimento Y e outras variáveis exógenas X_s . As elasticidades de rendimento e preços estimadas através deste tipo de modelo permitem obter alterações no curto prazo no que diz respeito à taxa de utilização dos equipamentos, e no longo prazo no que diz respeito ao stock de equipamento. Assim, este tipo de modelo não permite que seja analisada cada uma das componentes, e pode levar a estimativas enviesadas no caso de ser excluído uma variável relevante.

Alguns autores optam pela utilização de modelos não lineares, nomeadamente o modelo log-log.

$$\ln S = e^{P_E} e^Y e^{X_S} \quad (16)$$

Esta forma funcional é útil pois permitir uma maior simplicidade interpretativa uma vez que facilita a leitura imediata das elasticidades que no fundo definem o efeito directo.

Modelo de Equações Simultâneas

Apesar de requerer dados mais complexos, este modelo poderá fornecer outra perspectiva sobre os factores que contribuem para o efeito directo. A procura de trabalho útil pode ser desagregada de diversas formas de modo a quantificar o contributo de cada variável para o efeito total. Por exemplo o trabalho útil de uma lâmpada (S) pode ser quantificado em termos de lumens/hora por ano e decomposto no produto da capacidade total do stock de lâmpadas (CAP) pela utilização do mesmo stock ($UTIL$) em horas ano.

$$S = CAP * UTIL \quad (17)$$

Se ε_m for uma medida de eficiência média do stock de lâmpadas, o consumo total energia (E) em luz (kWh) é dado por: $E = CAP * UTIL * (1/\varepsilon_m)$ (Sorrell 2007). Assim;

$$CAP = f[P_K(\varepsilon), (P_E / \varepsilon_m), Y, X_c] \quad (18)$$

$$UTIL = g[(P_E / \varepsilon_m), Y, X_U] \quad (19)$$

$$\varepsilon_m = h[P_K(\varepsilon), P_E, UTIL, Y, X_\varepsilon] \quad (20)$$

onde $P_K(\varepsilon)$ representa o custo do capital das lâmpadas.

Assim é possível determinar o stock de lâmpadas em função do seu custo (P_K) que depende da eficiência, da sua eficiência (ε_m), do custo da energia (P_E) e de outros factores. Por outro lado a utilização é função do custo da energia (P_E) e a eficiência da lâmpada (ε_m).

A principal vantagem deste tipo funcional está no facto de poder isolar as componentes individuais da elasticidade de preço e rendimento incluindo o efeito directo.

Outros modelos funcionais utilizados para estimar o efeito directo são o modelo discreto/contínuo (Train, 1993 e Dubin e McFadden 1984), o modelo de produção doméstico (Archibald e Gillingham, 1981 e Quigley e Rubinfeld, 1989) e modelos funcionais lineares, log-lineares e double-log (Plourde e Ruyan, 1985 e Madlener, 1996).

2.4. Fontes de Enviesamento da Estimativa

Há um conjunto de fontes de enviesamento da estimativa do efeito directo sendo que a maior parte delas, levam a que o efeito directo seja sobrestimado. Estes factores terão que ser tomados em conta na escolha da forma funcional do modelo e escolha de variáveis.

Custo dos Inputs: Uma alteração do custo da energia geralmente não está correlacionada com alterações de outros inputs necessários para fornecer o serviço energético. A alteração (melhoria) da eficiência energética pode requerer novos equipamentos que correspondem a custos de capital superiores. Assim, estimativas do efeito directo que utilizam séries cronológicas e dados de painel podem sobrestimar o efeito directo.

Assimetria: A elasticidade procura preço da energia tende a ser superior em períodos onde os preços da energia estão a subir. Uma possível explicação é a de que custos de energia superiores provocam alterações tecnológicas. Contudo a *proxy* mais apropriada são reduções do preço de energia. Dado

que muitos estudos baseados em séries cronológicas analisam períodos onde a tendência geral dos preços é a de aumentar, a elasticidade procura preço pode sobrestimar a resposta dos consumidores num ambiente de redução do custo da energia.

Endogeneidade: Melhorias na eficiência energética podem incentivar os consumidores para aumentar o seu consumo de trabalho útil (por exemplo conduzir mais quilómetros depois de adquirir um automóvel mais eficiente). Contudo, os consumidores podem antecipar um aumento da procura de trabalho útil e por essa razão adquirir tecnologias com taxas de conversão superiores de energia em trabalho útil (adquirir um automóvel mais eficiente porque esperam no futuro conduzir mais quilómetros). Este facto sugere endogeneidade na medida em que a procura de trabalho útil depende do preço do trabalho útil que por sua vez depende da eficiência energética e da procura de trabalho útil. A endogeneidade pode ser corrigida através da utilização de modelos de equações simultâneas e outras técnicas tais como o uso do método de estimação das variáveis instrumentais.

3. Efeito Indirecto – Estudos Empíricos

3.1. Definição

O efeito indirecto que se relaciona com as implicações do aumento da produtividade da energia quando parcialmente substituído por trabalho e capital envolve o estudo das implicações macroeconómicas.

O efeito indirecto deriva de duas fontes, a energia necessária para produzir e instalar/implementar as medidas de eficiência energética (energia implícita) e os efeitos indirectos exercidos sobre o restante sistema económico pelas tais melhorias (efeitos secundários) (Sorell, 2007). O primeiro relaciona-se com o consumo de energia que ocorre anterior à melhoria de eficiência, enquanto que o segundo relaciona-se com o consumo energética após a melhoria.

Grande parte do aumento da eficiência energética pode ser considerado com a substituição de energia por trabalho e capital. Por exemplo, a energia utilizada pelo aquecimento central – serviço energético – pode ser substituída por isolamento térmico, ou seja, trabalho e capital. Esta substituição provoca uma transferência da energia do sector em que está actualmente a ser utilizada para outros sectores da economia que produzem capital (Kaufmann e Azary-Lee, 1990). Como resultado, o consumo de energia nos outros sectores aumenta.

Na prática, o ricochete com base em somente este efeito parece pouco provável uma vez que o custo energético de uma tecnologia mais eficiente deve ser inferior à poupança energética daí resultante. Se este não for o caso, este tipo de investimento não seria economicamente viável (Webb e Perace, 1975).

Em comparação com outras fontes de efeitos indirectos, espera-se que a contribuição desta fonte seja inferior no longo prazo do que no curto prazo porque a energia implícita existente na tecnologia assemelha-se a um custo de capital uma vez que a poupança energética futura diminui em importância ao longo da vida útil do bem.

A eficiência energética poderá também aumentar a procura de outros bens e serviços. A aquisição de uma viatura mais eficiente liberta poder de compra para o consumo de outros bens (Brookes 1990, Binswanger 2001). Estes bens e serviços irão ter um consumo directo e indirecto de energia sendo que o efeito líquido depende tanto das tecnologias utilizadas como das preferências individuais dos consumidores.

Alguns analistas afirmam que o efeito secundário proveniente da eficiência energética é relativamente pequeno (Lovins, et al., 1988, Greening e Greene 1998, Schipper e Grubb 2000) uma vez que a energia representa uma pequena parte dos gastos de consumo e a componente energética de todos os outros bens e serviços não é significativa. Segundo a lógica de Greening e Greene (1998), o efeito secundário deve representar apenas um

décimo do efeito directo uma vez que as tabelas *input-output* sugerem que o gasto efectivo em energia representa apenas 15% dos gastos totais dos consumidores. Um raciocínio análogo poderá ser seguido para os sectores produtivos da economia. Dado que a energia representa uma pequena componente dos custos de produção – normalmente inferior a 3% – e uma vez que o custo dos bens intermédios representam também uma pequena componente dos produtos finais, é possível afirmar que o efeito indirecto é muito inferior ao efeito directo (Greening e Greene 1998).

Contudo, como terá sido referido inicialmente por Brookes (1990), um aumento da produtividade da energia está normalmente associado ao aumento da produtividade do capital e trabalho o que poderá levar que a poupança de custos seja superior à poupança nos gastos energéticos. Por exemplo um consumidor que passe a utilizar uma bicicleta em vez de um automóvel particular poupa não apenas nos custos de combustível mas também na depreciação da viatura libertando assim rendimento adicional muito superior aos gastos energéticos, que pode ser consumido em outros bens e serviços energéticos (Alfredsson 2004).

3.2. Modelos de Equilíbrio Geral

Uma vez que o efeito indirecto sobre o consumo de energia não se restringe apenas ao sector específico onde o aumento da produtividade de energia se verificou, a quantificação deste valor implica analisar o sistema económico no seu todo e as interacções entre as propensões para consumir bens energéticos e as elasticidades. Estas interacções não podem ser devidamente analisadas com o recurso a modelos de equilíbrio parcial sendo necessário o recurso a modelos de equilíbrio geral.

Importa lembrar que o efeito ricochete estimado com o recurso a modelos de equilíbrio geral representa o efeito total no consumo de energia – directo e indirecto – pelo que será de esperar estimativas superiores ao do efeito directo.

Dos sete estudos realizados neste domínio, quatro afirmam existir *backfire* – um consumo de energia final superior aquele que se verificará na ausência de medidas de eficiência (Greppurud e Ramussen 2004, Hanley, et al., 2005 e Allan, et al., 2006). Estes estudos abrangem um vasto conjunto de regiões e sectores e levam a crer que o efeito indirecto sobre o consumo global de energia de um aumento da eficiência energética por via de um aumento da produtividade do trabalho e capital, são realmente relevantes na análise em questão.

Estas análises enfatizaram a importância da elasticidade de substituição entre a energia e outros factores produtivos. Contudo, Allen, et al., (2006) demonstra que a elasticidade de procura de exportações pode ter grande influência nos resultados. Outras componentes tais como a elasticidade oferta de capital e trabalho, a intensidade energética de cada sector produtivo, a elasticidade de substituição entre bens de consumo e a elasticidade procura rendimento pelos bens poderão também ser relevantes.

Os modelos de equilíbrio geral têm uma série de limitações que levaram alguns autores a questionar a sua adequação na determinação de políticas. A capacidade de prever diferentes cenários normalmente não é analisada e modelos diferentes normalmente fornecem resultados bastante distintos à mesma questão. Embora este tipo de modelo proporciona indicações valiosas, os resultados quantitativos devem ser interpretados adequadamente (Conrad 1999).

3.3. Energia, Produtividade e Crescimento Económico

Brookes (1990) terá sido o primeiro autor contemporâneo a estabelecer a relação entre a produtividade de energia e o crescimento económico com base em três argumentos: o crescimento do *total factor productivity*, a relação endógena e a acomodação.

Total Factor Productivity

O aumento da utilização de energias de melhor qualidade, nomeadamente electricidade, provocou uma mutação tecnológica que teve efeitos significativos na produtividade de outros factores produtivos que não a energia. Apesar da substituição de energia por outros factores de produção, as inovações tecnológicas estimularam a produção económica de tal forma que apesar do aumento da eficiência energética – e redução da intensidade energética – o consumo agregado de energia aumentou. Prevê-se que esta tendência se mantenha no futuro. Os argumentos de Brookes foram reforçados pelos trabalhos desenvolvidos por Schurr (1982) e Jorgenson (1984).

Endogeneidade

O método comum de quantificar a poupança energética proveniente de melhorias de eficiência é através da comparação do consumo anual de energia com uma estimativa daquilo que seria o consumo energético caso a intensidade energética se mantiver constante. Para Brookes (1990), a energia aliada à capacidade de inovação do homem é a única razão pela qual o aumento da população e produção foi possível durante os últimos 200 anos. Este aumento teria ocorrido caso as taxas de conversão energética ficassem pelos valores verificados no início do Século XIX – próximo de 1% (Brookes 2000)?

Acomodação

Brookes (1984) afirma que as melhorias de eficiência energética tendem a acomodar o aumento dos preços. Neste caso o ponto de equilíbrio entre a oferta e a procura será estabelecido com um preço superior aquele onde não se verifica a eficiência e um consumo superior. Este argumento baseia-se no facto da elasticidade rendimento dos serviços energéticos tendem a ser inferior à medida que a economia se desenvolve.

Saunders (1992) contribuiu significativamente para o debate do efeito ricochete através da sua análise aos modelos económicos neoclássicos. Ao aceitar a validade dos modelos neoclássicos, Saunders (1992) conseguiu prever que o *backfire* é o resultado da eficiência energética aplicado à função de produção sugerindo assim que a eficiência energética conduzirá a

um efeito ricochete significativo. Este facto aliado ao aumento da produtividade de outros factores leva a crer que o efeito ricochete pode ser superior ao previsto inicialmente por muitos analistas.

As estimativas do efeito indirecto, além de se serem poucas, apresentam uma variabilidade significativa e alguns dos estudos aplicados apresentam um conjunto de falhas que nos obrigam a aceitar os valores com cepticismo. Regra geral os resultados mais consistentes para a estimação do efeito indirecto podem ser obtidas através de modelos macroeconómicos aplicados a um país individualmente. A conclusão principal a reter destes estudos é o facto de ser necessário ter em conta a natureza da melhoria de eficiência energética e o sector específico onde se verifica, o que torna a generalização de um efeito agregado difícil de calcular.

II. Modelo Teórico

A procura de combustível para viaturas pessoais é um dos temas mais estudados na economia da energia. Este facto deve-se aos dados que são utilizados para estudar este fenómeno. Embora em muitos países esta informação seja disponibilizada por empresas de recolha de informação ou por inquéritos aos consumidores (como por exemplo o inquérito aos quilómetros percorridos elaborado pelo *Federal Highway Administration in Highway Statistics* nos EUA), não existe qualquer base de dados ou histórico que contenha esta informação para o mercado Português. Por isso optou-se por analisar o sector do transporte rodoviário de mercadorias onde será possível analisar o fenómeno do efeito ricochete através da recolha de informação de várias fontes nacionais.

1. Enquadramento Conceptual

Face às alterações tecnológicas que provocam um aumento da produtividade da energia, os consumidores e produtores ajustam o seu comportamento de modo a reflectir o custo inferior do serviço energético. Assim, o efeito ricochete é constituído pelas três componente enumeradas abaixo:

Efeito Directo – O consumidor opta por consumir mais do recurso em vez de realizar a poupança de custos. Esta componente é caracterizada por um efeito rendimento.

Efeito Indirecto – O consumidor opta por aplicar a poupança de custos adquirindo outros bens e serviços que também consomem energia. Esta componente é caracterizada por um efeito substituição.

Efeito Dinâmico de Mercado – A redução da procura para um dado recurso irá implicar a redução do seu preço, o que torna o recurso mais susceptível de ser utilizado de outras formas. Por exemplo, inicialmente a

electricidade era utilizada apenas para iluminação. Com a redução do seu preço, passou-se a utilizar este recurso em outros aparelhos electrónicos.

2. Definição do Sector do Transporte Rodoviário de Mercadorias

O transporte rodoviário de mercadorias representa em Portugal 66% do volume total de mercadorias transportadas, tendo sido transportado em 2006, 291,0 milhões de toneladas entre pontos do território nacional e 30,2 milhões de toneladas entre o território nacional e outros países da União Europeia. Em 2006 foi percorrido um total de 4.093,8 milhões de quilómetros por uma frota nacional de cerca de 122 mil veículos consumindo um total de 871 milhões de litros de gasóleo.

2.1. Factores Que Influenciam a Procura do Transporte Rodoviário

A) Evolução do Clima Económico

A expectativa cada vez maior dos consumidores e a procura crescente de uma mobilidade pessoal, requerem cadeias logísticas e redes de transporte inter modais eficazes nos quais o transporte rodoviário desempenha um papel essencial. O transporte rodoviário presta uma enorme contribuição, talvez desproporcionada, ao crescimento económico e numerosas necessidades de transporte não podem ser satisfeitas senão pelo transporte rodoviário¹. Neste sentido a evolução do clima económico pode ser considerada como o factor mais importante na definição da procura deste serviço. A existência de um sistema logístico eficiente e abrangente é de tal modo importante que durante o último meio século a construção de infra-estruturas de transportes (rodoviário, marítimo e aéreo) tem sido uma prioridade na maior parte dos países industrializados.

Contudo, a necessidade de transporte apenas existe porque esta é uma componente essencial da especialização mundial. Sem a necessidade de

¹ Mensagem de S.A.I. Príncipe Akishino (Japão) na abertura do Congresso Mundial do IRU (International Road Transportation Union) 2004.

transportar matérias-primas, bens intermédios ou produtos manufacturados não havia necessidade de interligar os diversos pontos de produção aos locais de consumo. Por isso o transporte rodoviário está muito dependente desta dinâmica económica. Aliás, é possível verificar uma forte relação tanto dos quilómetros percorridos como da carga transportada com a evolução do PIB. Os sistemas de transporte eficazes são o motor das economias realizadoras. O transporte rodoviário é uma componente chave destes sistemas.

B) Custos dos factores de produção

Regra geral a procura de um determinado bem ou serviço está negativamente relacionada com o seu preço. Contudo, numerosos estudos sobre o comportamento do consumidor mostram que a elasticidade procura preço de várias formas de energia é muito rígida – Hanley, et al., (2002), Goodwin (1992), Espey (1998) e Graham & Glaister (2002) – ou seja, os consumidores não respondem a um aumento do preço com uma redução equivalente da procura. Este facto pode ser explicado pela relativa dependência de determinados sectores de actividade face às diferentes formas de energia.

No caso do transporte rodoviário de mercadorias, embora as empresas de transporte sejam agentes económicos tais como as famílias, estes têm formas diferentes de reagir à alteração do custo dos factores de produção. No caso de uma família, com a alteração dos preços relativos dos bens de consumo, o individuo tende a reajustar os seus padrões de consumo de modo a maximizar a sua utilidade. No caso das empresas, e sendo a energia um factor de produção tal como o trabalho e o capital, estas podem (1) reajustar o seu aparelho de produção aos novos preços relativos através da substituição de um factor de produção por outro (por exemplo a substituição de capital por energia face a um aumento dos custos da energia) ou (2) passar o aumento dos custos de produção ao consumidor do serviço. No primeiro caso a empresa decide adaptar-se aos novos preços (realocação de recursos é efectuado pela empresa) e no segundo caso os consumidores do serviço é que vão decidir se pretendem ou não continuar a

consumir o serviço com este novo preço (realocação de recursos é efectuado pelo consumidor). Em qualquer das situações o custo dos factores de produção estão efectivamente a definir a procura do serviço.

C) Custo Relativo Face às Alternativas de Transporte

Face à crescente integração operacional e logística dos sistemas de produção das economias, em muitos casos um determinado serviço de transporte pode ser satisfeito através de um conjunto de modos. Por exemplo, o transporte de contentor desde o norte do país ao sul pode ser satisfeito através de via marítima, rodoviária ou ferroviária. A opção pelo modo de transporte será determinado em muitos casos pelas necessidades específicas do transporte mas na maior parte das situações será determinada pelo custo de cada alternativa.

Assim, os custos operacionais e a competitividade de cada meio de transporte não são independentes. No caso de se assistir a uma inovação tecnológica que permita a determinado modo reduzir os custos praticados pelo serviço, a actividade dos restantes modos será influenciado na medida em que serão obrigados a inovar igualmente para manter a competitividade do seu serviço ou cessar a exploração.

Mudanças na competitividade relativa podem também ocorrer por questões alheias às empresas transportadoras. Um aumento generalizado dos custos de produção pode afectar de forma diferente cada modo de transporte. No contexto actual, o aumento generalizado do custo da energia afecta menos o transporte rodoviário do que o marítimo por exemplo. A criação de novas infra-estruturas pode permitir o acesso a novos mercados por parte de um meio de transporte que normalmente não o teria acesso. A construção de um aeroporto ou uma auto-estrada permite poupar tempo tornando os modos de transporte que o utilizam mais atractivos.

D) Sensibilidade à Alteração de Determinados Custos

Fruto das alterações abruptas da cotação do petróleo nos mercados internacionais, o custo da energia é o factor de produção que apresenta uma maior volatilidade para esta indústria. Dado que o custo da energia representa cerca de 43,3% dos custos operacionais, qualquer alteração afecta imediatamente este tipo de operação. Desde o início da década, o preço ao consumidor do gasóleo rodoviário aumentou cerca de 98%, com 29% deste aumento apenas nos últimos dois anos. Este facto obriga a que as empresas de transporte actualizem semanalmente os preços cobrados pelo serviço. A ANTRAM passou a publicar semanalmente um ajuste quilométrico da variação do gasóleo de modo a facilitar o acompanhamento deste custo de produção por parte dos transportadores. Embora este custo seja facilmente observado e assimilado pelas empresas de transporte, nem sempre é fácil fazer passar este custo ao cliente final. Assim, para muitas empresas (especialmente de menor dimensão) qualquer variação do custo do gasóleo pode por em causa a continuação da sua actividade.

E) Alternativas Energéticas

Por enquanto existem poucas alternativas ao gasóleo mineral utilizado como fonte energética para as viaturas de transporte de mercadorias. Actualmente a utilização de biodiesel de primeira e segunda geração e o lançamento de viaturas híbridos são as alternativas que estão ao dispor do mercado.

O biodiesel de primeira geração é provavelmente o biocombustível mais utilizado em toda a Europa. Este combustível produzido através de fontes renováveis e derivado de óleos vegetais e demais oleaginosas ou de gorduras animais, pode ser utilizado em motores a gasóleo misturado com o diesel mineral. Uma das razões porque a utilização deste produto não tem sido adoptado em larga escala prende-se com o facto de ter um grau de solvabilidade diferente ao diesel mineral e de ser miscível em água. Para massificar a utilização de biodiesel de primeira geração seria necessário a construção de novas infra-estruturas de produção, transporte e comercialização porque ao utilizar as actuais infra-estruturas corria-se o risco de fugas e contaminação.

Fruto do método de produção, o biodiesel de segunda geração permite a utilização de concentrações de 100% em motores a gasóleo ao passo que o biodiesel de primeira geração apenas permite concentrações de 20%. Este produto quando refinado tem características químicas essencialmente idênticas ao gasóleo mineral – não é miscível em água – por isso é compatível com as actuais infra-estruturas de comercialização

Actualmente existem vários modelos de viaturas híbridas mas a quase totalidade destes automóveis são viaturas pessoais que utilizam gasolina. Dado o sucesso comercial destas viaturas, os construtores estão a apostar fortemente em híbridos de gasóleo. Embora esta tecnologia ainda não esteja disponível nas viaturas pessoais, a empresa Norte Americana *General Motors* já produz híbridos a gasóleo que são utilizados por empresas de autocarros para o transporte de passageiros. Esta tecnologia tem muitas sinergias possíveis com os motores a gasóleo porque os motores a gasóleo são otimizados no transporte de cargas pesadas durante longas distâncias e velocidades constantes. A tecnologia híbrida pode melhorar substancialmente o consumo de combustível enquanto o motor está a acelerar, em trânsito citadino e enquanto a viatura está parada através da utilização de um motor eléctrico, e no futuro poderá ser o *standard* em termos de transporte de mercadorias.

2.2. Estrutura de Custos da Operação

Embora o transporte rodoviário de mercadorias seja uma actividade que requer um investimento inicial ainda significativo, a sua estrutura de custos tem um peso significativo de custos variáveis. De acordo com a sua publicação “Anuário 2008” a Associação Nacional de Transportadores Públicos Rodoviários de Mercadorias (ANTRAM), cerca de 63,2% dos custos totais da operação são variáveis. Estes custos incluem tudo desde o combustível às mudanças de óleo. Dos custos variáveis, o input que mais pesa são os custos com gasóleo que representam cerca de 43,3% dos

custos totais. Dos custos fixos, aquele que maior peso tem na exploração são as amortizações com cerca de 11,9%².

3. Modelo Teórico – Transporte Rodoviário de Mercadorias

A estimação do efeito directo, do aumento da eficiência energética sobre o consumo total de combustível utilizado no transporte rodoviário de mercadorias, requer a formulação de uma relação funcional entre uma medida de eficiência energética e o consumo de combustível neste sector económico. Assim pretende-se estimar uma equação onde as variáveis têm a seguinte relação:

$$E = f(S, \varepsilon) \quad (21)$$

Em que

S representa a procura total do serviço energético e

ε representa a eficiência média do parque automóvel nacional

Conforme já referido existem três relações básicas que podem ser utilizadas para caracterizar a relação entre a procura de um serviços energético (S), a eficiência de determinado sistema energética (ε) e o consumo agregado de energia (E); que são as seguintes:

$$\text{Definição 1: } \eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1 \quad (22)$$

$$\text{Definição 2: } \eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{Ps}(S) - 1 \quad (23)$$

$$\text{Definição 3: } \eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{PE}(S) - 1 \quad (24)$$

Estas definições mostram que o efeito sobre o consumo agregado de energia de uma variação da eficiência do sistema energético é função (1) da elasticidade da procura do serviço em relação a eficiência energética ($\eta_{\varepsilon}(S)$), (2) da elasticidade da procura do serviço em relação ao preço do

² Operação média de um conjunto articulado de 40 Toneladas (Peso Bruto) que percorre 84 mil km por ano.

serviço ($\eta_{Ps}(S)$) e (3) da elasticidade da procura do serviço em relação ao preço da energia ($\eta_{PE}(S)$). Assim torna-se necessário estimar uma relação de procura do serviço energético transporte terrestre em função da eficiência e preço.

$$S = f(P_S, P_E, \varepsilon) \quad (25)$$

Em que

S representa a serviço energético;

P_S representa o custo do serviço energético;

P_E representa o custo da energia.

A procura do transporte rodoviário de mercadorias pode ser influenciada pela actividade económica, o custo/preço de prestação do serviço e a competitividade deste modo de transporte face às outras alternativas de transporte.

Assim se:

Tkm = procura do serviço de transporte de uma tonelada-quilómetro (S);

P_{Tkm} = o custo energético do transporte de uma tonelada-quilómetro (P_s);

PIB = produto interno bruto a preços constantes;

Bbl = o custo em Euros do barril de petróleo como medida de custo das alternativas de transporte;

temos que

$$Tkm = f(P_{Tkm}, PIB, Bbl) \quad (26)$$

ou assumindo uma especificação exponencial

$$Tkm = e^{\beta_0} P_{Tkm}^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3} + e \quad (27)$$

Tkm servirá como proxy para a variável S e P_{Tkm} servirá como proxy para a variável P_s .

III. Análise Empírica

1. Definição das Variáveis

1.1. Preço por Tonelada-Quilómetro

O custo do produtor (preço do consumidor) de transportar uma tonelada de mercadoria um quilometro é influenciado principalmente por duas questões de ordem operacional:

- 1 – Quanto custa percorrer um quilómetro?
- 2 – Quanto é possível transportar de uma só vez?

Como medida de custo de cada quilometro transportado foi considerado apenas o custo energético – consumo de combustível – sendo esta a variável que importa analisar no âmbito do efeito directo. De acordo com o anuário anual da ANTRAM, os gastos em combustível representam cerca de 45% do custo total de operação de um camião de transporte. Embora os restantes encargos representem mais de 50% dos custos operacionais totais, a variabilidade destes é inferior sendo o impacto da variação do preço do gasóleo reflectido rapidamente no preço praticado pelo serviços do que qualquer outro encargo.

Seja:

P_c = o preço real do gasóleo no ano t (Base 1987) medido em €/litro;

km = distancia percorrida por viaturas de transporte de mercadorias medida em quilómetros no ano t ;

Ton = toneladas transportadas no ano t ;

l/km = eficiência energética média das viaturas de transporte medida em litros por quilometro no ano t .

Se $LF = \frac{ton}{km}$ então o custo de transportar uma tonelada-quilometro é assim

definido da seguinte forma:

$$P_{Tkm} = f(P_C, LF, l/km) \quad (28)$$

$$P_{Tkm} = \frac{P_C}{\frac{LF}{l/km}} \quad (29)$$

Analisando a equação (29) podemos ver que o custo de transporte de uma tonelada-quilometro é afectada positivamente pelo preço do combustível e pelo consumo médio das viaturas ($\Delta P_{Tkm} > 0$) enquanto que é afectada negativamente pelo aumento da carga média das viaturas ($\Delta P_{Tkm} < 0$).

ε é uma medida de eficiência operacional representando uma relação entre a carga média das viaturas e o consumo médio das viaturas da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{LF}{l/km} \quad (30)$$

A equação (29) pode ser escrita como:

$$P_{Tkm} = \frac{P_C}{\varepsilon} \quad (31)$$

Deste modo é fácil identificar a relação entre o custo do serviço e a eficiência energética do sistema. À semelhança de outros sistemas energéticos há mais do que uma forma de aumentar a eficiência operacional. Neste caso pode ser (1) através do aumento da carga transportada por viagem ($\Delta LF > 0$), ou (2) através da redução do consumo de combustível das viaturas ($\Delta l/km < 0$).

1.2. Produto Interno Bruto Real

A evolução do produto interno bruto é uma das medidas que avalia a evolução da actividade económica de um país. Conforme já referido o crescimento da actividade económica exige o transporte de pessoas e bens entre pontos distantes. Considerou-se o PIB a preços constantes com base em 1987, deflacionado para retirar o efeito do aumento generalizado dos preços. Esta informação foi obtida através das Séries Longas do Banco de Portugal para o período 1987-1995 e os relatórios anuais do Banco de Portugal para o período 1996-2006.

1.3. Competitividade do Transporte Terrestre

O transporte rodoviário de mercadorias é apenas um dos modos de transporte de mercadorias à semelhança do transporte marítimo, rodoviário e aéreo. A estrutura de custos de cada actividade tem um diferente peso relativo de energia mas em todos os casos a variação do custo da energia afecta o custo de cada serviço.

No caso do transporte marítimo e aéreo, uma variação do preço da energia tenderá a ter um maior impacto na estrutura de custos da actividade do que no transporte rodoviário. O combustível da aviação (*Jet*) e transporte marítimo (gasóleo de exportação e fuelóleo) não é tributado em sede de Imposto Especial sobre o Consumo (IEC). O gasóleo rodoviário está sujeito ao Imposto sobre os Produto Petrolíferos (ISP), que incide sobre cada litro comercializado e uma variação do preço base da energia tem efeitos imediatos mas não proporcionais na sua estrutura de custos. Por exemplo a variação de 1% no barril de petróleo aumenta os custos de energia em 1% – ignorando o efeito das margens de refinação. No caso do transporte rodoviário o efeito é inferior uma vez que o gasóleo já está tributado. Uma variação de 1% do barril de petróleo tem um impacto nos custos em $(1 - \text{ISP})\%$. Podemos então concluir que, um aumento do preço da energia

primária torna o transporte rodoviário mais competitivo face às restantes alternativas.

Os valores utilizados consistem na cotação média anual do *West Texas Intermediate (WTI)* publicados pelo *New York Mercantile Exchange (NYMEX)* convertido para euros, utilizando a média da taxa de cambio oficial do Banco de Portugal para o Escudo entre 1986-1998 e para o Euro entre 1999 e 2006. Este valor nominal foi deflacionado e representa o custo real do barril de petróleo em Euros.

1.4. Estimação de Parâmetros

Essencialmente todos os estudos iniciais que tinham como objectivo a quantificação do efeito directo utilizaram como método de estimação o método dos mínimos quadrados simples. Blair (1984), Greene (1992), Jones (1993) e Wheaton (1982) utilizaram este método de estimação para servir de base à quantificação do efeito directo no transporte automóvel pessoal nos EUA. Contudo com a generalização de métodos de estimação mais complexos foi possível enfrentar algumas lacunas apresentadas pelos modelos de mínimos quadrados simples.

Um tema que normalmente não foi abordado pelos primeiros estudos foi o da existência da endogeneidade das variáveis independentes. Em muitos casos existe uma correlação entre a eficiência energética e o custo de outros inputs conforme afirmam Einhorn (1982) e Lovins, et al., (1988). O recurso a um modelo que não aborda directamente a questão da endogeneidade pode levar à sobrestimação do efeito directo. Para estes autores o recurso a modelos mais sofisticados – mínimos quadrados de duas e três fases, modelos estruturais e o recurso a variáveis instrumentais – torna as estimativas do efeito directo empiricamente mais consistentes.

Neste contexto, o presente trabalho recorre aos métodos de estimação dos mínimos quadrados simples e os mínimos quadrados de duas fases para estimar os coeficientes do modelo de procura de modo a comparar as

estimativas obtidas e ajuizar sobre a existência de endogeneidade no modelo dos mínimos quadrados simples.

2. Estimação Pelos Mínimos Quadrados Simples

Tendo como base as definições da secção anterior, a procura do transporte rodoviário de mercadorias – conforme a equação (26) – pode ser expresso da seguinte forma:

$$Tkm = \beta_1 \frac{P_C}{LF} + \beta_2 PIB + \beta_3 Bbl + e \quad (31)$$

l / km

Dado que no âmbito deste trabalho, o objecto de análise – o efeito directo – é normalmente expresso em termos percentuais foi necessário expressar a equação (31) recorrendo a um forma funcional log-log. Assim a equação (31) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\ln Tkm = \beta_0 + \beta_1 \ln P_{Tkm} + \beta_2 \ln PIB + \beta_3 \ln Bbl + e \quad (32)$$

ou:

$$Tkm = e^{\beta_0} \left(\frac{P_C}{LF} \right)^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3} + e \quad (33)$$

l / km

em que:

$$\ln Tkm = \beta_0 + \beta_1 \ln \frac{P_C}{LF} + \beta_2 \ln PIB + \beta_3 \ln Bbl + e \quad (34)$$

l / km

Com o recurso ao método de estimação dos mínimos quadrados simples obtivemos a seguinte equação de regressão da procura do transporte rodoviário de mercadorias:

$$\ln T_{km} = -1,165 - 0,244 \ln P_{Tkm} + 0,961 \ln PIB + 0,160 \ln Bbl \quad (35)$$

(t)	(-0,786)	(-2,225)	(14,124)	(2,587)
(sig)	(-0,443)	(0,041)	(0,000)	(0,020)

2.1. Análise à Qualidade do Modelo

Com o objectivo de avaliar a capacidade explicativa do modelo de regressão da equação (35) torna-se necessário proceder a alguns testes para avaliar a consistência empírica da regressão.

Significância Estatística dos Parâmetros

Como teste à significância estatística de cada estimador da equação (35) seja:

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ com } i = 0, 1, 2, 3$$

em que

$$\beta_0 = \text{constante}$$

$$\beta_1 = \text{estimador do coeficiente da variável } P_{Tkm}$$

$$\beta_2 = \text{estimador do coeficiente da variável } PIB$$

$$\beta_3 = \text{estimador do coeficiente da variável } Bbl$$

De acordo com as estatísticas t dos parâmetros, os 19 graus de liberdade e com $\alpha = 5\%$, é possível rejeitar a H_0 para todos os parâmetros com a excepção da constante. O facto de aceitar a H_0 para a constante em nada invalida a legitimidade estatística dos restantes parâmetros. Concluimos

que todas as variáveis exógenas da equação (35) contribuem para a definição da variável exógena.

Significância Conjunta do Modelo

Através da análise da estatística F de Fischer da equação de regressão (35), será possível ajuizar sobre a validade conjunta do modelo na medida em que o teste será o seguinte:

$$H_0 : \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Dado que a estatística F de Fischer do modelo de regressão (35) apresenta um valor de 109,653 e o F crítico é de 0,115 com $\alpha = 5\%$ e com 2 e 16 graus de liberdade, o modelo de regressão apresenta uma robustez estatística levando-nos a rejeitar H_0 .

Qualidade do Ajustamento do Modelo

A equação de regressão (35) apresenta um R^2 ajustado de 94,5%. Assim, as variáveis exógenas do modelo explicam 94,5% de toda a variância da variável exógena. Aliás, os estudos que têm como finalidade a análise ao efeito directo, normalmente apresentam ajustamentos próximos ou superiores a 95%.

2.2. Verificação da Autocorrelação

A existência de autocorrelação implica que o erro de estimação de um período está relacionado com o erro de períodos anteriores que normalmente se deve à omissão de uma ou mais variáveis que afecta sistematicamente o valor estimado da variável dependente e consequentemente o erro em cada período.

$$E(e_t, e_{t-k}) \neq 0 \tag{36}$$

O facto de um modelo econométrico apresentar autocorrelação lança dúvidas sobre a qualidade do modelo mesmo havendo uma qualidade de ajustamento do modelo (R^2) elevada.

No seu estudo, Mayo e Mathis (1988) vêm-se obrigados a estimar a equação de distância percorrida pelo método dos mínimos quadrado de três fases. Inicialmente ao estimar a equação pelo método dos mínimos quadrados verifica-se a existência de autocorrelação, pelo que foi necessário encontrar uma forma alternativa de estimação e corrigir pela autocorrelação.

Greene (1992) identifica a presença de autocorrelação no seu modelo de estimação de quilómetros percorridos, e vê-se obrigado a corrigir este efeito. Este introduz na equação todas as variáveis desfasadas – incluindo um termo para o erro e a variável dependente – para testar a significância de cada parâmetro de modo a eliminar a autocorrelação mas também para determinar qual o desfasamento mais adequado das diferentes variáveis. Greene (1992) argumenta que o facto de estudos anteriores não terem corrigido pela autocorrelação, resultaram em estimativas enviesadas do efeito directo a longo prazo.

Assim optou-se por testar a existência de autocorrelação no modelo através de três métodos.

Durbin-Watson

A estatística Durbin-Watson é um teste estatístico utilizado para identificar a presença de autocorrelação numa regressão. Uma estatística Durbin-Watson próximo de 2 indica a ausência de autocorrelação.

A estatística de Durbin-Watson obtido para a equação de regressão (35) foi de 1,978 que desde logo faz prever a ausência de autocorrelação no

modelo. Pretende-se contudo testar a existência de correlação com um nível de significância de 1%.

Temos assim as seguintes estatísticas de teste:

$$DW = 1,978$$

$$\alpha = 1\%$$

$$gl_1 = 3$$

$$gl_2 = 20$$

$$dl = 0,862$$

$$du = 1,270$$

com a definição da H_0 sendo

$$H_0 = E(e_t, e_{t-1}) \neq 0$$

A estatística Durbin-Watson da regressão (35) cai no intervalo entre o du e $4 - dl$ ($du \leq DW \leq 4 - dl$) e por isso é possível não rejeitar H_0 e comprova-se que de facto o modelo não apresenta qualquer sinal de autocorrelação.

Regressão dos Erros

Ainda para testar a existência de autocorrelação entre o erro de um período com o erro do período anterior, podemos construir uma regressão dos erros em que a variável exógena seja o erro do período t e a variável endógena o erro do período t_{-1} .

Assim

$$e_t = a + \beta_1 e_{t-1} \tag{37}$$

em que

e_t representa o erro do período t ; e

e_{t-1} representa o erro do período t_{-1} .

Se o erro do período t estiver relacionado com o erro do período t_{-1} , o estimador β_1 deve ser estatisticamente significativo e a ausência de autocorrelação pode ser definida como:

$$H_0; \beta_1 = 0$$

Substituindo os erros estimados da equação (35) no modelo (37) obtemos a seguinte regressão:

$$e_t = 0,002 - 0,024e_{t-1} \quad (38)$$

t (,207) (-,099)
sig (,839) (,923)

O estimador β_1 da equação (38) não é estatisticamente significativo o que nos leva a aceitar a H_0 comprovando novamente a ausência de autocorrelação no modelo.

Breusch-Godfrey

O teste de Breusch-Godfrey, consiste em estimar os resíduos (e_t) que resultam de uma regressão (neste caso equação 35) e efectuar uma regressão destes resíduos tendo como variáveis explicativas todas as variáveis dependentes da equação (35) mais o erro do período anterior (e_{t-1}). Breusch e Godfrey demonstraram que o valor $(n-p)R^2$ segue uma distribuição Qui-Quadrado com p graus de liberdade sendo o R^2 o resultado da regressão, n o numero de observações e p o número de defasamentos.

Assim a formulação do novo modelo de regressão é o seguinte:

$$e_t = \alpha + \beta I_{nt} + e_{t-1} + \varepsilon \quad (39)$$

$$e_t = \alpha + \beta PIB + \beta P_{Tkm} + \beta Bbl + e_{t-1} + \varepsilon \quad (40)$$

A hipótese a testar e a estatística de teste será o seguinte:

$$(n - p)R^2 \sim \chi^2_{np}$$

Da regressão (40) resultou os seguintes parâmetros:

$$e_t = 1,098 - 0,040 PIB + 0,027 P_{Tkm} + 0,003 Bbl - 0,046 e_{t-1} \quad (41)$$

$$t \quad (,441) \quad (-,491) \quad (,223) \quad (,050) \quad (-,165)$$

$$\text{sig} \quad (,666) \quad (,631) \quad (,827) \quad (,961) \quad (,871)$$

$$(n - p)R^2 = -4,644$$

$$\chi^2_{17;1\%} = 6,408$$

Dado que $(n - p)R^2 < \chi^2_{17;1\%}$ não rejeitamos H_0 e é possível excluir a existência de autocorrelação no modelo.

2.3. Exogeneidade da Variável Preço

A teoria económica diz que o preço de um bem é função da quantidade no mercado (mantendo a procura constante). Por outro lado a quantidade oferecida é também determinada em função do preço de mercado. Assim para muitos bens é difícil identificar o sentido da causalidade – a procura afecta o preço ou o preço afecta a procura. Nos modelos econométricos esta questão é relevante uma vez que as variáveis exógenas pretendem explicar as endógenas, mas o sentido da relação pode ser invertida – variável endógena explica a exógena.

No modelo em questão, pretende-se explicar a procura de determinado serviço energético em função de um conjunto de variáveis onde está

incluído o preço. O preço do serviço energético do transporte é composto por um conjunto de variáveis onde o factor mais relevante é o preço do combustível. À partida, uma vez que em grande parte o preço do combustível é formado nos mercados internacionais, e sendo este um factor exógeno à economia portuguesa, não é de esperar se verificar uma relação significativa entre a procura do transporte rodoviário de mercadorias e o preço deste serviço. Contudo a hipótese de endogeneidade da variável preço será testada estatisticamente de forma a garantir que não existe enviesamento ao nível dos parâmetros estimados.

Teste de Hausman

A exogeneidade da variável preço será testada com recurso à metodologia aplicada por Hausman (1978) que consiste em comparar os estimadores dos mínimos quadrados simples com os mínimos quadrados a dois passos.

Hausman (1978) supõe que seja pretendido a estimação de uma regressão onde se acredita que a procura de determinado bem no momento t (Q_t) seja função do seu preço no momento t (P_t), e um outro conjunto de variáveis explicativas (I_1, I_2, I_n).

$$Q_t = \alpha + \beta_1 P_t + \beta_n I_{nt} + e_t \quad (42)$$

No caso de existirem dúvidas quanto a exogeneidade da variável preço, Hausman propõem a estimação da variável preço (P_t) em função das restantes variáveis exógenas do modelo,

$$P_t = \alpha + \beta_n I_{nt} + v_t \quad (43)$$

de tal forma que

$$\hat{P}_t = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_n I_{nt} \quad \text{ou} \quad P_t = \hat{P}_t + \hat{v}_t \quad (44)$$

Se Q_t for a variável quantidade no período t considerada como endógena, o Teste de Hausman baseia-se na estimação da seguinte equação de regressão:

$$Q_t = \alpha + \beta_1 \hat{P}_t + \beta_2 \hat{v}_t + \beta_n I_{nt} + e_{2t} \quad (45)$$

Havendo endogeneidade da variável preço, a correlação entre o erro da equação (43) e da equação (45) será estatisticamente significativo ou seja $E(v_t, u_{2t}) = 0$.

Assim sendo para hipótese nula, ou seja, a existência de endogeneidade da variável preço, temos um teste de hipóteses definido da seguinte forma:

$$H_0 : E(v_t, u_{2t}) = 0$$

$$H_1 : E(v_t, u_{2t}) \neq 0$$

Aplicando o teste de Hausman à equação (35) verificamos que os estimador do coeficiente \hat{v}_t é significativo a 96% o que nos leva a aceitar a hipótese nula que de facto na equação (35) a variável preço (P_{Tkm}) é endógena face á variável dependente (Tkm).

Teste de Causalidade de Granger

O teste de causalidade de Granger (1969) tem como propósito testar o sentido da causalidade entre duas variáveis e pode também ser utilizado para analisar a endogeneidade de uma variável independente. Para analisar a relação de causalidade entre duas variáveis (X e Y), este método assume que a informação relevante para a estimação de uma variável (X) cifra-se naquela contida nas séries X e Y e por isso as estimativas de X podem ser obtidas através das séries desfasadas de X e Y e vice versa.

Formalmente temos o seguinte:

$$X_t = aY_{t-1} + bX_{t-1} + e_t \quad (46)$$

$$Y_t = cX_{t-1} + dY_{t-1} + u_t \quad (47)$$

onde e_t e u_t são resíduos não correlacionados.

Face as estimativas dos coeficientes é possível distinguir entre quatro relações causais entre as variáveis X e Y .

- | | |
|---|--|
| 1) Causalidade Unilateral de Y para X | $\begin{cases} a \neq 0 \\ d = 0 \end{cases}$ |
| 2) Causalidade Unilateral de X para Y | $\begin{cases} a = 0 \\ d \neq 0 \end{cases}$ |
| 3) Simultaneidade | $\begin{cases} b \neq 0 \\ d \neq 0 \end{cases}$ |
| 4) Independência | $\begin{cases} b = 0 \\ d = 0 \end{cases}$ |

Estimando os coeficientes das equações (46) e (47) com os dados utilizados na regressão (35) obtemos os seguintes resultados:

$$Tkm_t = 0,054P_{Tkm_{t-1}} + 0,843Tkm_{t-1} \quad (48)$$

$$(t) \quad (0,424) \quad (7,543)$$

$$(sig) \quad (0,677) \quad (0,000)$$

$$P_{Tkm_t} = 0,539Tkm_{t-1} + 0,478P_{Tkm_{t-1}} \quad (49)$$

$$(t) \quad (3,411) \quad (2,661)$$

$$(sig) \quad (0,004) \quad (0,017)$$

De acordo com as estimativas acima, concluímos que existe uma relação da variável P_{Tkm} para a variável Tkm uma vez que $a \neq 0$ e $d = 0$.

À semelhança do Teste de Hausman, o Teste de Causalidade de Granger comprova que existe de facto endogeneidade da variável preço, ou seja, que a variável P_{Tkm} depende estatisticamente da variável Tkm .

3. Estimação Pelos Mínimos Quadrados de Duas Fases

O método de estimação dos mínimos quadrados de duas fases é um método que permite efectuar uma regressão quando alguns dos pressupostos dos mínimos quadrados simples são violados.

A estimação pelo método das variáveis instrumentais permite a estimação de parâmetros consistentes quando as variáveis explicativas estão correlacionadas com o erro. Tal endogeneidade pode acontecer quando a variável dependente provoca alterações em pelo menos uma das variáveis explicativas, quando uma variável relevante está ausente do modelo ou quando as variáveis explicativas estão sujeitas a um elevado grau de erro de medição. Nestes casos a estimação pelos mínimos quadrados simples normalmente devolve estimativas para os coeficientes enviesados e não consistentes. Contudo, através do recurso a variáveis instrumentais estimativas consistentes e não enviesadas ainda podem ser obtidas.

Uma variável instrumental é uma variável que não está presente na formulação do modelo de regressão como variável explicativa mas que está correlacionada com a variável exógena (variável com problema de endogeneidade).

3.1. Escolha da Variável Instrumental

Através do Teste de Hausman e do Teste de Causalidade de Granger, verificou-se que a variável explicativa (P_{Tkm}) é de facto endógena, ou seja, existe uma relação de causalidade da variável explicada Tkm para a variável explicativa P_{Tkm} .

A utilização de variáveis instrumentais pode ser utilizado para ultrapassar esta violação dos pressupostos dos mínimos quadrados simples. A variável instrumental deve estar correlacionada com a variável P_{Tkm} , $E(P_{Tkm_t}, VI_t) \neq 0$, e não deve estar correlacionada com o erro de estimação, $E(e_t, VI_t) = 0$.

Uma vez que a variável P_{Tkm} é uma variável composta por quatro variáveis (P_c , LF , D_c , e km) qualquer uma destas variáveis pode ser utilizado como instrumento. A escolha da variável dependerá assim daquela que apresente a maior correlação com a variável P_{Tkm} e menor correlação com o erro.

A variável do consumo médio de combustível (l/km) surge como aquela que mais se adequa a uma variável instrumento para a regressão em questão devido às seguintes correlações:

$$E(P_{Tkm_t}, l/km_t) = 0,755 \quad \alpha = 99\%$$

$$E(e_t, l/km_t) = 0,002 \quad \alpha = 6\%$$

3.2. Estimação da Regressão

Através do recurso ao método de estimação dos mínimos quadrados de duas fases e utilizando a variável instrumental l/km que está estatisticamente correlacionada com a variável P_{Tkm} e não correlacionada com o erro de estimação da equação (35) obtemos a seguinte equação de procura de transporte rodoviário de mercadorias:

$$\ln Tkm = -1,607 - 0,241 \ln P_{Tkm} + 0,959 \ln PIB + 0,159 \ln Bbl \quad (50)$$

$$(t) \quad (-0,719) \quad (-2,012) \quad (13,511) \quad (2,437)$$

$$(sig) \quad (0,483) \quad (0,061) \quad (0,000) \quad (0,027)$$

3.3. Análise à Qualidade do Modelo

À semelhança da análise efectuada a regressão (35), torna-se necessário avaliar a qualidade do modelo da regressão (50).

Significância Estatística dos Parâmetros

Como teste à significância estatística de cada estimador da equação (50) estimado através de variáveis instrumentais, seja:

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ com } i = 0, 1, 2, 3$$

em que

β_0 = constante;

β_1 = estimador do coeficiente da variável P_{Tkm} estimado com recurso à variável instrumental l/km ;

β_2 = estimador do coeficiente da variável PIB ;

β_3 = estimador do coeficiente da variável Bbl .

Para 19 graus de liberdade e $\alpha = 5\%$, podemos rejeitar H_0 apenas para os estimadores β_2 e β_3 , ou seja, apenas os estimadores das variáveis PIB e Bbl são estatisticamente significativos a 95%. À semelhança da equação (35) estimada através dos mínimos quadrados simples, o coeficiente da constante β_0 não é significativa.

O estimador da variável P_{Tkm} – que foi estimado com recurso a uma variável instrumental (l/km) – devolveu uma estatística t de -2,012 tornando esta parâmetro apenas significativo com $\alpha = 10\%$. A correcção de uma violação de um pressuposto dos estimadores dos mínimos quadrados simples foi feita à custa da significância estatística do coeficiente estimado da variável P_{Tkm} .

Significância Conjunta do Modelo

Através da análise da estatística F de Fischer da equação de regressão (50) será possível validar a capacidade explicativa conjunto do modelo.

Sendo

$$H_0 : \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

e

$$F_{2,16,5\%} = 0,115; F = 109,35$$

Rejeitamos a H_0 concluindo que de facto os parâmetros $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ e β_4 são no seu conjunto estatisticamente significativos.

Qualidade do Ajustamento do Modelo

A equação de regressão (50) apresenta um R^2 ajustado de 94,5%. As variáveis exógenas do modelo explicam 94,5% de toda a variância da variável exógena. A qualidade de ajustamento do modelo estimado através da variável instrumental l/km é idêntica ao valor do R^2 ajustado do modelo estimado através dos mínimos quadrados simples.

3.4. Verificação de Autocorrelação

Regressão dos Erros

Adoptando a mesma metodologia utilizada na secção 2.2. para testar a existência de autocorrelação do modelo estimado através dos mínimos quadrados simples pretende-se agora averiguar a existência de

autocorrelação no modelo estimado através do método das variáveis instrumentais.

Na ausência de autocorrelação,

$$H_0; \beta_1 = 0$$

Assim, substituindo os erros estimados da equação (50) na equação (37) obtemos a seguinte equação de regressão:

$$e_t = 0,002 - 0,025e_{t-1} \quad (51)$$

t (,208) (-,103)
sig (,838) (,919)

O estimador do erro desfasado em um periodo da regressão (50) não é estatisticamente significativo. Assim, aceitamos a H_0 comprovando a ausência de autocorrelação no modelo.

Breusch-Godfrey

Para testar a existência de autocorrelação na equação de regressão (50) será aplicado o teste de Breusch-Godfrey à semelhança do teste efectuado a equação de regressão (35).

Adoptando a formulação existente das linhas (39) e (40) a hipótese a testar e a estatística de teste será o seguinte:

H_0 : não há autocorrelação

$$(n - p)R^2 \sim \chi^2_{np}$$

Assim da equação de regressão (40) e utilizando os erros gerados pela regressão (50) resultou os seguintes parâmetros:

$$e_t = 1,048 - 0,039PIB + 0,024P_{Tkm} + 0,005Bbl - 0,044e_{t-1} \quad (52)$$

t	(,422)	(-,475)	(,197)	(,070)	(-,160)
sig	(,680)	(,642)	(,846)	(,945)	(,875)

$$(n - p)R^2 = -4,644$$

$$\chi^2_{17;1\%} = 6,408$$

Dado que $(n - p)R^2 < \chi^2_{17;1\%}$ não rejeitamos H_0 e é possível excluir a existência de autocorrelação no modelo.

4. Escolha do Modelo

À semelhança de estudos anteriores sobre este tema, foi desenvolvido acima uma análise empírica às características de um modelo de procura de transporte terrestre rodoviário tendo como base a forma funcional log-log e estimado com o recurso a duas metodologias de estimação – mínimos quadrados simples e variáveis instrumentais.

A estimação do modelo de procura através dos mínimos quadrados simples fez com que surgissem sérias dúvidas sobre a endogeneidade da variável P_{Tkm} conforme foi comprovado através do teste de Hausman e Teste de Causalidade de Granger. Assim qualquer conclusão sobre o efeito directo no transporte rodoviário de mercadorias que tenha como base na regressão (35), pode ser posto em causa mesmo que o modelo apresente uma qualidade de ajustamento elevada e a significância estatística de todos os parâmetros estimados (com a excepção da constante).

A questão da endogeneidade foi resolvida através da estimação do modelo de procura através de variáveis instrumentais. Foi utilizado como instrumento a variável l/km que tem uma correlação elevada com a variável P_{Tkm} e baixa correlação com o erro no modelo dos mínimos quadrados simples. Para além de efectivamente resolver o problema da endogeneidade da variável preço, este modelo também apresenta uma boa

qualidade de ajustamento do modelo e a significância estatística dos coeficientes estimados.

As interpretações teóricas a efectuar sobre o efeito directo no transporte rodoviário de mercadorias será efectuado através da apreciação do modelo estimado com base nas variáveis instrumentais (50).

IV. Interpretação de Resultados

1. Modelo Empírico

Para determinar a magnitude do efeito directo no consumo de combustível do transporte rodoviário de mercadorias, foi analisada a formulação de um modelo log-log tendo com base dois métodos de estimação – o método dos mínimos quadrados simples e métodos dos mínimos quadrados de duas fases.

Optou-se por uma forma funcional log-log de modo a facilitar a interpretação das elasticidades obtidas através da estimação, conforme a metodologia utilizada pelo Gateley (1992), Greene (1992), Jones (1993) e Schimek (1996).

Aquando da estimação dos coeficientes da regressão (35) através dos mínimos quadrados simples foi detectado a existência de endogeneidade da variável preço (P_{Tkm}) face a variável quantidade (Tkm). Como forma de garantir a exogeneidade da variável preço, uma nova regressão (50), foi estimada através do método dos mínimos quadrados de duas fases tendo como variável instrumental o indicador l/km para cada período.

Assim, a especificação e forma funcional que mais se adequa aos dados recolhidos é a seguinte:

$$\ln Tkm = \beta_1 + \beta_2 \ln P_{Tkm} + \beta_3 \ln PIB + \beta_4 \ln Bbl$$

Obtiveram-se as seguintes estimativas:

$$\ln Tkm = -1,607 - 0,241 \ln P_{Tkm} + 0,959 \ln PIB + 0,159 \ln Bbl$$

(t)	(-0,719)	(-2,012)	(13,511)	(2,437)
(sig)	(0,483)	(0,061)	(0,000)	(0,027)

Através de uma análise exaustiva à qualidade do modelo de regressão (50) levado a cabo na secção III, estabeleceu-se que os estimadores dos coeficientes são simultaneamente eficientes e consistentes. O modelo também apresenta uma qualidade de ajustamento na ordem dos 94,5% pelo que é seguro afirmar que esta formulação é aquela que mais se adequa ao fenómeno a analisar no período em questão.

2. Elasticidades

Tendo com base os coeficientes estimados da equação de regressão (50) obteve-se as seguintes estimativas para a magnitude do efeito directo utilizando as três definições conforme Sorrel (2007).

Tabela 2 – Resumo de Resultados de Estimação

	$\eta_{\epsilon}(E)$	$\eta_{\epsilon}(S)$	$\eta_{Ps}(S)$	$\eta_{PE}(S)$	Efeito Directo
Definição 1	-99,0%	1,0%	-	-	1,0%
Definição 2	-75,9%	-	-24,1%	-	24,1%
Definição 3	-75,9%	-	-	-24,1%	24,1%

Tendo com base o resumo bibliográfico elaborado por Sorrel (2007), a elasticidade da procura de energia (ou o serviço energético) em relação ao preço – $\eta_{PE}(S)$ e $\eta_{Ps}(S)$ – pode ser considerado como um limite superior ao efeito directo de um determinado serviço energético (Hanley, et al., (2002) e Taylor e tal (1977)). Contudo, devido a questões que se prendem com a reacção assimétrica do consumidor face às alterações do custo da energia – o consumidor não responde a uma redução do preço na mesma magnitude que um aumento – considera-se a estimativa do efeito directo através da definição dois – $\eta_{\epsilon}(S)$ – como sendo mais consistente.

Assim, o efeito directo no transporte rodoviário de mercadorias – a percentagem do aumento da eficiência energética que não se traduz na redução do consumo de energia provocado por uma redução do custo real do serviço – está situado entre um limite inferior de 1,2% e um limite

superior de 24,1%. Em consequência do explicado no parágrafo anterior, podemos considerar que esteja na realidade próximo do limite inferior deste intervalo.

Embora o sector em análise seja fundamentalmente diferente da maior parte dos estudos sobre o tema dos transportes, (transporte pessoal vs. transporte de mercadorias) os resultados obtidos são consistentes com aqueles obtidos por Blair (1984), Mayo e Mathis (1988), Greene (1992) e Schmieck (1996). Aliás, Sorrel (2007) aponta como intervalo provável do efeito directo do transporte automóvel algures entre 3% e 87% sendo o *best guest* entre 10% e 30%.

Analisando concretamente os resultados do estudo elaborado e utilizando como referência um valor para o efeito directo de 10, qualquer melhoria operacional em que resulte num custo energético inferior em 1% provoca uma redução do consumo de energia de 0,9%. Isto é, qualquer alteração tecnológica (redução do consumo em litros por quilómetro das viaturas) ou operacional (percorrer menos quilómetros sem carga) não resulta numa redução equivalente do consumo agregado de combustível.

3. Significado Económico

Dado que a maioria dos estudos sobre este tema dedicam-se à análise do transporte pessoal importa identificar quais são os factores relevantes que influenciam a existência de um efeito directo no transporte rodoviário de mercadorias e o transporte pessoal. As características do transporte rodoviário de mercadorias tem algumas semelhanças ao transporte pessoal nomeadamente no que diz respeito a indicadores fundamentais de eficiência, mas varia significativamente quanto ao raciocínio económico no momento da tomada de decisão do agente.

Indicadores tais como o consumo energético das viaturas e o custo do combustível podem ser analisado no mesmo contexto – em qualquer dos casos a variação de qualquer um destes indicadores provoca uma alteração no custo do serviço. No caso do indivíduo resulta numa modificação da sua

estrutura de utilidade e no caso da empresa altera o equilíbrio óptimo entre factores de produção afectando assim os quilómetros percorridos e a procura de outros factores de produção.

Analisando em concreto o transporte rodoviário de mercadorias, verificamos uma aproximação aos valores estimados pelos estudos anteriores ao transporte automóvel pessoal. O resultado embora consistente com a literatura levanta algumas questões. Saunders (2000) afirma que quanto maior for a possibilidade de substituição entre energia e outros factores de produção – capital e trabalho – maior será o efeito directo. Assim, se o transportador optar por uma viatura mais eficiente, está efectivamente a substituir o consumo de energia pelo consumo de capital.

Dado o elevado peso que o custo da energia representa para este sector (quase 50%), o transportador será incentivado a substituir energia por capital. Ainda mais, a actividade altamente intensiva (condução durante dias inteiros) permite diluir qualquer custo fixo adicional por via de economias de escala. Estes dois factores não estão presentes no transporte automóvel pessoal – normalmente o custo de energia apenas representa uma pequena parte dos custos totais e o equipamento é utilizado apenas durante alguns períodos do dia. Todos estes factores leva-nos a esperar que o efeito directo seja superior no transporte de mercadorias quando comparado com o transporte pessoal.

Dado o efeito directo estimado neste estudos ser idêntico identifica-se alguns factores poderiam ter contribuído para este fenómeno. Embora exista de facto um incentivo mais forte para a substituição de capital por energia no sector do transporte de mercadorias, a inexistência de tecnologias alternativas utilizadas em larga escala torna a opção pela aquisição de viaturas mais eficientes menos atractivo. Em alternativa, as empresas transportadoras optam pelas melhorias operacionais – através da aquisição de viaturas de maior dimensão que permite o transporte de mais mercadorias – como forma de melhorar a eficiência da operação. Este facto pode ser comprovado através transporte médio por quilómetro que passou de 4,1 toneladas por quilómetro em 1987 para 7,6 toneladas por quilómetro

em 2006. Neste mesmo período o consumo médio de combustível passou de 14,1 litros por 100 quilómetros para 37,8 litros por 100 quilómetros. Assim, neste sector em particular, os ganhos de eficiência operacional são mais determinantes do que os ganhos tecnológicos.

V. Conclusões

A utilização eficiente de energia tem sido avançada como a solução ideal para as actuais limitações energética das economias desenvolvidas. Os defensores desta filosofia afirmam que esta será a solução para dois dos constrangimentos actuais ao crescimento da actividade económica: a escassez de energia e a emissão de gases de efeito estufa.

Contudo, não pode ser negligenciado o efeito que as mutações tecnológicas terão no comportamento de todos aqueles que consomem este recurso. Uma melhoria tecnológica equivale à expansão da actual fronteira de possibilidades de produção e seria imprudente considerar que os agentes económicos limitarão o crescimento da produção por razões irracionais.

O efeito do aumento da eficiência energética no consumo de combustível foi analisado, tendo como base a estimação de um efeito directo para o transporte rodoviário de mercadorias em Portugal para o período entre 1987 e 2006. A forma funcional adoptada foi de log-log sendo o método de estimação utilizado, os mínimos quadrados de duas fases.

Verificou-se que o aumento da eficiência energética em 1% resulta numa redução do consumo de energia em 0,9% – um efeito directo de cerca de 10%. Face a estas conclusões, e tendo em conta o consumo de combustível deste sector em 2006, estimativas da redução do consumo de combustível que não consideram o efeito directo poderão estar sobre estimadas em cerca de 0,87 milhões de litros de gasóleo por ano para cada ponto percentual de aumento da eficiência energética. Este valor torna-se relevante na medida qualquer estratégia energética terá que o ter em conta na definição de políticas de actuação.

Constatou-se também, que em Portugal, as empresas transportadoras dispensam as melhorias tecnológicas implícitas nas viaturas mais eficientes a favor de melhorias operacionais. Estas melhorias não dependem da importação de tecnologias mas sim de uma melhor adequação dos recursos

da empresa ao serviço a prestar o que pode explicar a não utilização de tecnologias mais eficientes.

O debate acerca do efeito directo pode ser sintetizado com a seguinte citação (Birol e Keppler, 2000) que explica a razão porque existem duas visões tão distintas sobre o tema do efeito ricochete:

"Para os economistas o mundo é um campo aberto em que os diferentes factores de produção e bens de consumo têm de ser constantemente recombinações com o maior retorno em resposta aos seus preços... O aumento da eficiência é apenas um factor que causa uma recombinação devido a alteração implícita dos seus preços e daí um efeito ricochete ... Para um engenheiro, o mundo consiste num conjunto de tecnologias e actividades que determinam a procura e onde a proporção de cada um é constante. Qualquer aumento de produtividade de um factor afecta apenas esse factor por isso o efeito ricochete não existe."

Bibliografia

Alfredsson, E. C., (2004) "Green consumption - no solution for climate change", *Energy Policy*, 29, 513-24.

Allan, G., Hanley, P., McGregor, J., Swales, K., Turner, K., (2006) "*The macroeconomic rebound effect and the UK economy*", Final report to the Department Of Environment Food and Rural

ANTRAM, Relatório Annual 2008.

Archibald, R. e Gillingham, R., (1981) "A Decomposition of the Price and Income Elasticities of the Consumer Demand for Gasoline", *Southern Economic Journal*, 47, 1021-31.

Berkhout, P., Muskens, J., Velthuisen, J., (2000) "Defining the rebound effect", *Energy Policy*, 28, 425-432

Binswanger, M., (2001) "Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?", *Ecological Economics*, 36, 119-132

Birol, F., Keppler, J., (2000) "Prices, technology development and the rebound effect", *Energy Policy*, 28, 457-69.

Blair, R. D., D. L. Kaserman, and R. C. Tepel, (1984) "The Impact of Improved Mileage on Gasoline Consumption", *Economic Inquiry*, 22, 209-17.

Brookes, L., (1984) "Long-term equilibrium effects of constraints in energy supply", *The Economics of Nuclear Energy*, Leonard Brookes and H. Motamen eds, Chapman e Hall, London.

Brookes, L., (1990) "The Greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution", *Energy Policy*, 199-201.

Brookes, L., (1992) "Energy efficiency and economic fallacies: a reply", *Energy Policy*, 390-392.

Brookes, L., (2000) "Energy efficiency fallacies revisited", *Energy Policy*, 28, 355-366

Conrad, K., (1999) "*Computable general equilibrium models for environmental economics and policy analysis*, in *Handbook of Environmental and Resource Economics*", J.C.J.M van de Bergh, Edward Elgar, Cheltenham, UK.

Dubin, J. A. e McFadden, D. L., (1984) "An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption", *Econometrica*, 52, 345-62.

Einhorn, M., (1982) "Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances: an extension", *Energy Journal*, 3, 103-09.

Espey, M., (1998) "Gasoline demand revisited: an international meta-analysis of elasticities", *Energy Economics*, 20, 273-95.

Frondel, M., Peters, J., e Vance, C., (2007) "*Identifying the rebound: issues and empirical evidence from a German household panel*", RWI Discussion Papers No. 57 Essen.

Gately, D., (1992) "Imperfect price reversed ability of US gasoline demand: asymmetric responses to price increases and declines", *Energy Journal*, 13, 179-207.

Graham, D. J., Glaister, S., (2002) "The demand for automobile fuel: a survey of elasticities", *Journal of Transport Economics and Policy*, 36, 1-26.

Granger, C. W. J. (1969) "Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods", *Econometrica* 37, 424-438.

Greene, D., (1992) "Vehicle Use and Fuel Economy: How Big is the "Rebound" Effect?", *Energy Journal*, 13, 117-143

Greene, D., Kahn, J., Gibson, R., (1999) "Fuel Economy Rebound Effect for US Household vehicles" *The Energy Journal*, 20, 3.

Greenhalgh, G., (1990) "Energy Conservation Policies", *Energy Policy*, Abril, 293-299.

Greening, L. A., e Greene, D. L., (1998) "*Energy use, technical efficiency, and the rebound effect: a review of the literature*", Report to the U.S. Department of Energy, Hagler Bailly and Co., Denver.

Grepperud, S., Rasmussen, I., (2004) "A general equilibrium assessment of rebound effects", *Energy Economics*, 26, 261-82.

Grubb, M.J., (1990) "Energy efficiency and economic fallacies", *Energy Policy*, 783-785.

Goldberg, P. K., (1996) "*The effect of the corporate average fuel efficiency standards*" Working Paper N°: 5673, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.

Goodwin, P. B., (1992) "A Review of New Demand Elasticities with Special Reference to Short and Long-Run Effects of Price Changes", *Journal of Transport Economics and Policy*, 26, 155-69.

Hanly, M., Dargay, J., e Goodwin, P., (2002) "*Review of Income and Price elasticities in the demand for road traffic*", ESRC Transport Studies Unit, London.

Hanley, N., McGregor, P. G., Swales, J. K., e Turner, K., (2005) "Do increases in resource productivity improve environmental quality? Theory and evidence on rebound and backfire effects from an energy-economy-environment regional computable general equilibrium model of Scotland", Department of Economics, University of Strathclyde, Strathclyde.

Haughton, J., Sarkar S., (1996) "Gasoline tax as a corrective tax: Estimates for the United States, 1970-1991", *Energy Journal*, 17(2), 103-26.

Hausman, J. (1978) "Specification Testes in Econometrics". *Econometrica*, 46, 1251-1271

Herring, H., Elliot, M., (1990) "Letter to the editor", *Energy Policy*, 18, 786.

Herring, H., (2006) "Energy efficiency-a critical view", *Energy Policy*, 31, 10-20.

Hsueh, L.-M. e Gerner, J. L., (1993) "Effect of Thermal Improvements in Housing on Residential Energy Demand", *Journal of Consumer Affairs*, 27, 87-105.

Jevons, W., (1865) "Of the Economy of Fuel", em *Organization & Environment*, Mar 2001, 14

Johansson, O. e Schipper, L., (1997) "Measuring long-run automobile fuel demand: separate estimations of vehicle stock, mean fuel intensity, and mean annual driving distance", *Journal of Transport Economics and Policy*, 31, 277-92.

Jones, C., (1993) "Another look at U.S. passenger vehicle use and the "rebound" effect from improved fuel efficiency" *The Energy Journal*, 14, 99.

Jorgenson, D. W., (1984) "The role of energy in productivity growth", *The Energy Journal*, 5.

Kaufmann, R. K. e Azary-Lee, I. G., (1990) "A biophysical analysis of substitution: does substitution save energy in the US forest products industry?", *Ecological economics: its implications for forest management and research*", *Workshop* efectuado em St. Paul, Minnesota, Abril 2006

Keepin, K., Kats, G., (1988) "Greenhouse Warming: Comparative Analysis of Nuclear and Efficiency Abatement Strategies" *Energy Policy*, 538-561.

Khazzoom, J.D., (1980) "Economic Implications of mandated efficiency in standards for household appliances", *Energy Journal*, 1, 21-39.

Klein, Y. L., (1987) "Residential energy conservation choices of poor households during a period of rising energy prices", *Resources and Energy*, 9, 363-78.

Klein, Y. L., (1988) "An econometric model of the joint production and consumption of residential space heat", *Southern Economic Journal*, 55, 351-59.

Lovins, A., Henly, J., Ruderman, H., e Levine, M., (1988) "Energy saving resulting from the adoption of more efficient appliances: another view; a follow-up", *The Energy Journal*, 9, 155.

Madlener, R., (1996) "Econometric analysis of residential energy demand: a survey", *The Journal of Energy Literature*, II.2, 3-31.

Mayo, J. W., Mathis, J. E., (1988) "The Effectiveness of Mandatory Fuel Efficiency Standards in Reducing the Demand for Gasoline", *Applied Economics*, 20, 211-19.

Orasch, W. e Wirl, F., (1997) "Technological efficiency and the demand for energy (road transport)", *Energy Policy*, 25, 1129-36.

Puller, S. L. e Greening, L. A., (1999) "Household adjustment to gasoline price change: an analysis using 9 years of US survey data", *Energy Economics*, 21, 37-52.

Plourde, A. e Ruyan, D., (1985) "On the use of double log forms in energy demand analysis", *The Energy Journal*, 6, 105-14.

Quigley, J. e Rubinfeld, D., (1989) "Unobservables in consumer choice: residential energy and the demand for comfort", *Review of Economics and Statistics*, 71, 416-25.

Saunders, H., (1992) "The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth". *Energy Journal*, 13, 4

Saunders, H., (2000) "Does predicted rebound depend on distinguishing between energy and energy services?", *Energy Policy*, 28, 497-500

Schipper, L., e Grubb, M., (2000) "On the rebound? Feedback between energy intensities and energy uses in IEA countries", *Energy Policy* 28, 367-388.

Schipper, L., M. Josefina, L. P. Figueroa, e Espey, M., (1993) "Mind the gap The vicious circle of measuring automobile fuel use", *Energy Policy*, 21, 1173-90.

Schimek, P., (1996) "Gasoline and travel demand models using time-series and cross-section data from the United States", *Transportation Research Record*, 1558, 83-89.

Schurr, S.H., (1982) "Energy efficiency and productive efficiency: some thoughts based on American experience" *The Energy Journal*, 3.

Small, K., Van Dender, K., (2005) "A study to evaluate the effect of reduced greenhouse gas emissions on vehicle miles travelled", Preparado para o

State of California Air Resources Board, California Environment Protection Agency e o California Energy Commission.

Sorrell, S., (2007) "*The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*" Relatório elaborado pelo Sussex Energy Group para o Technology and Policy Assessment function Energy Research Centre do Reino Unido.

Taylor, L. D., Blattenberger, G. R., e Verleger, P. K., (1977) "*The residential demand for energy*", EA-235, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Toke, D., (1990) "Increasing energy supply not inevitable" *Energy Policy*, 18, 671-73.

Train, K., (1993) "*Qualitative Choice Analysis: Theory Econometrics, and an Application to Automobile Demand*", MIT Press, Boston.

Webb, M. e Pearce, D., (1975) "The economics of energy analysis", *Energy Policy*, 3, 318-31.

West, S. E., (2004) "Distributional effects of alternative vehicle pollution control policies", *Journal of Public Economics*, 88, 735-57.

Wheaton, W. C., (1982) "The Long-Run Structure of Transportation and Gasoline Demand", *Bell Journal of Economics*, 13, 439-54.

Anexos

Derivação da Definição do Efeito Directo

$$Tkm = P_{Tkm}^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3}$$

$$\ln Tkm = \beta_1 \ln P_{Tkm} + \beta_2 \ln PIB + \beta_3 \ln Bbl$$

Derivação Definição 1

$$Tkm = P_{Tkm}^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3}$$

$$Tkm = \left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right)^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3}$$

$$\ln Tkm = \beta_1 \ln \left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right) + \beta_2 \ln PIB + \beta_3 \ln Bbl$$

$$\eta_\varepsilon(E) = \eta_\varepsilon(S) - 1$$

$$\eta_\varepsilon(S) = \frac{\partial Tkm}{\partial \varepsilon} * \frac{\varepsilon}{Tkm}$$

$$\eta_\varepsilon(S) = \beta_1 \left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right)^{\beta_1 - 1} \left(-\frac{P_C}{\varepsilon^2} \right) * PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3} * \frac{\varepsilon}{Tkm}$$

$$\eta_\varepsilon(S) = \beta_1 \left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right)^{\beta_1 - 1} \left(-\frac{P_C}{\varepsilon^2} \right) * \frac{PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3}}{\left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right)^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3}}$$

$$\eta_\varepsilon(S) = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon}{P_C} \right) \left(-\frac{P_C}{\varepsilon^2} \right)$$

$$\eta_\varepsilon(S) = -\frac{\beta_1}{\varepsilon}$$

$$\eta_\varepsilon(E) = -\frac{\beta_1}{\varepsilon} - 1$$

Derivação Definição 2

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_S}(S) - 1$$

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{\partial Tkm}{\partial P_{Tkm}} * \frac{P_{Tkm}}{Tkm}$$

$$\eta_{P_S}(S) = \beta_1 P_{Tkm}^{\beta_1 - 1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3} * \frac{P_{Tkm}}{Tkm}$$

$$\eta_{P_S}(S) = \beta_1 P_{Tkm}^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3} * \frac{1}{P_{Tkm}^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3}}$$

$$\eta_{P_S}(S) = \beta_1$$

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\beta_1 - 1$$

Derivação Definição 3

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(S) - 1$$

$$\eta_{P_E}(S) = \frac{\partial Tkm}{\partial P_C} * \frac{P_C}{Tkm}$$

$$\eta_{P_E}(S) = \beta_1 \left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right)^{\beta_1 - 1} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3} \frac{P_C}{Tkm}$$

$$\eta_{P_E}(S) = \beta_1 \left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right)^{\beta_1 - 1} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3} \frac{P_C}{\left(\frac{P_C}{\varepsilon} \right)^{\beta_1} PIB^{\beta_2} Bbl^{\beta_3}}$$

$$\eta_{P_E}(S) = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon}{P_C} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) P_C$$

$$\eta_{P_E}(S) = \beta_1$$

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\beta_1 - 1$$

Método de Estimação Mínimos Quadrados Simples

Tabela 3 - Estimação de coeficientes para a procura de Toneladas-Quilómetros

Variáveis	
$\ln Tkm$	Dependente
$\ln PIB$	Explicativa
$\ln P_{Tkm}$	Explicativa
$\ln Bbl$	Explicativa

Variável	Constante	$\ln PIB$	$\ln P_{Tkm}$	$\ln Bbl$
Coeficiente	1,653	0,961	-0,244	0,160
Erro Padrão	2,102	0,068	0,110	0,062
Estatística T	-0,786	14,124	-2,225	2,587
Significância	0,443	0,000	0,041	0,020
N=20				
R2 Ajustado	0,945			
Estatística F	109,653			
Significância F	0,000			
Durbin-Watson	1,978			

<u>Durbin-Watson</u>	
N=20	
K=3	
dl	0,862
du	1,27
4-dl	3,138
4-du	2,73

Tabela 4 – Regressão dos Erros

Variáveis	
e_t	Dependente
e_{t-1}	Explicativa

Variável	Constante	e_{t-1}
Coefficiente	0,002	-0,024
Erro Padrão	0,012	0,239
Estatística T	0,207	-0,099
Significância	0,839	0,923
N=19		
R^2 Ajustado	-0,058	

Tabela 5 – Teste Breusch-Godfrey

Variáveis	
e_t	Dependente
e_{t-1}	Explicativa
$\ln PIB$	Explicativa
$\ln P_{Tkm}$	Explicativa
$\ln Bbl$	Explicativa

Variável	Constante	e_{t-1}	$\ln PIB$	$\ln P_{Tkm}$	$\ln Bbl$
Coefficiente	1,098	-0,046	-0,040	0,027	0,003
Erro Padrão	2,487	0,278	0,082	0,122	0,067
Estatística T	0,441	-0,165	-0,491	0,223	0,050
Significância	0,666	0,871	0,631	0,827	0,961
N=19					
R^2 Ajustado	-0,258				
Estatística F	0,077				
Significância F	0,988				

$$(n - p)R^2 = (19 - 1) * (-,258) = -4,644$$

Tabela 6 – Teste de Hausman

1ª Fase – Estimação da Regressão $\hat{P}_t = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_n I_{nt}$

Variáveis	
$\ln P_{Tkn}$	Dependente
$\ln PIB$	Explicativa
$\ln Bbl$	Explicativa

Variável	Constante	$\ln PIB$	$\ln Bbl$
Coefficiente	-15,710	0,421	0,423
Erro Padrão	2,656	0,110	0,091
Estatística T	-5,916	3,824	4,667
Significância	0,000	0,001	0,000
N=20			
R^2 Ajustado	0,701		
Estatística F	23,271		
Significância F	0,000		

2ª Fase – Estimação da Regressão $Q_t = \alpha + \beta_1 \hat{P}_t + \beta_2 \hat{v}_t + \beta_n I_{nt} + e_{2t}$

Variáveis	
$\ln Tkm$	Dependente
$\ln \hat{P}_{Tkm}$	Explicativa
$\ln PIB$	Explicativa
$\ln Bbl$	Explicativa
\hat{v}_t	Explicativa

Variável	Constante	$\ln \hat{P}_{Tkm}$	$\ln PIB$	$\ln Bbl$	\hat{v}_t
Coefficiente	2,185	0,135	0,858	0,057	-0,244
Erro Padrão	1,202	0,097	0,050	0,041	0,110
Estatística T	1,818	1,388	17,198	1,388	-2,225
Significância	0,088	0,184	0,000	0,184	0,041
N=20					
R^2 Ajustado	0,945				
Estatística F	109,657				
Significância F	0,000				

Tabela 7 – Teste de Causalidade de Granger

$$\ln Tkm_t = \ln P_{Tkm_{t-1}} + \ln Tkm_{t-1}$$

Variáveis	
$\ln Tkm$	Dependente
$\ln P_{Tkm_{-1}}$	Explicativa
$\ln Tkm_{-1}$	Explicativa

Variável	Constante	$\ln P_{Tkm_{-1}}$	$\ln Tkm_{-1}$
Coefficiente	3,929	0,054	0,843
Erro Padrão	2,938	0,127	0,112
Estatística T	1,338	0,424	7,543
Significância	0,200	0,677	0,000
N=19			
R^2 Ajustado	0,819		
Estatística F	41,645		
Significância F	0,000		

$$\ln P_{Tkm_t} = \ln Tkm_{t-1} + \ln P_{Tkm_{t-1}}$$

Variáveis	
$\ln P_{Tkm}$	Dependente
$\ln P_{Tkm-1}$	Explicativa
$\ln Tkm_{-1}$	Explicativa

Variável	Constante	$\ln P_{Tkm-1}$	$\ln Tkm_{-1}$
Coefficiente	-14,838	0,478	0,539
Erro Padrão	4,151	0,180	0,158
Estatística T	-3,573	2,661	3,411
Significância	0,003	0,017	0,004
N=19			
R^2 Ajustado	0,672		
Estatística F	19,447		
Significância F	0,000		

Método de Estimação Mínimos Quadrados Duas Fases

Tabela 8 – Estimação de Coeficientes para a Procura de Toneladas-Quilómetro

Variáveis	
$\ln T_{km}$	Dependente
$\ln PIB$	Explicativa e Instrumental
$\ln P_{T_{km}}$	Explicativa e Instrumental
$\ln Bbl$	Explicativa e Instrumental
$\ln l / km$	Instrumental

Variável	Constante	$\ln PIB$	$\ln P_{T_{km}}$	$\ln Bbl$
Coeficiente	-1,607	0,959	-0,241	-0,159
Erro Padrão	2,236	0,071	0,120	0,065
Estatística T	-0,719	13,511	-2,012	2,437
Significância	0,483	0,000	0,061	0,027
N=20				
R^2 Ajustado	0,945			
Estatística F	109,350			
Significância F	0,000			

Tabela 9 – Escolha da Variável Instrumental

		D_C	$Dist$	P_C	l/km	LF	P_{Tkm}	e_i
D_C	Correlação	1,00	0,18	-0,04	0,99	0,95	0,81	0,05
	Pearson Sig.		0,45	0,88	0,00	0,00	0,00	0,83
$Dist$	Correlação	0,18	1,00	0,14	0,06	0,13	0,05	0,46
	Pearson Sig.	0,45		0,55	0,81	0,59	0,82	0,04
P_C	Correlação	-0,04	0,14	1,00	-0,07	-0,10	0,44	0,15
	Pearson Sig.	0,88	0,55		0,78	0,68	0,05	0,53
l/km	Correlação	0,99	0,06	-0,07	1,00	0,94	0,81	-0,01
	Pearson Sig.	0,00	0,81	0,78		0,00	0,00	0,95
LF	Correlação	0,95	0,13	-0,10	0,94	1,00	0,66	0,12
	Pearson Sig.	0,00	0,59	0,68	0,00		0,00	0,60
P_{Tkm}	Correlação	0,81	0,05	0,44	0,81	0,66	1,00	0,00
	Pearson Sig.	0,00	0,82	0,05	0,00	0,00		1,00
e_i	Correlação	0,05	0,46	0,15	-0,01	0,12	0,00	1,00
	Pearson Sig.	0,83	0,04	0,53	0,95	0,60	1,00	

Tabela 10 – Regressão dos Erros

Variáveis	
e_t	Dependente
e_{t-1}	Explicativa

Variável	Constante	e_{t-1}
Coefficiente	0,002	-0,025
Erro Padrão	0,012	0,239
Estatística T	0,208	-0,103
Significância	0,838	0,919
N=19		
R2 Ajustado	-0,058	
Estatística F	0,011	
Significância F	0,919	

Tabela 11 – Teste Breusch-Godfrey

Variáveis	
e_t	Dependente
e_{t-1}	Explicativa
$\ln PIB$	Explicativa
$\ln P_{Tkm}$	Explicativa
$\ln Bbl$	Explicativa

Variável	Constante	e_{t-1}	$\ln PIB$	$\ln P_{Tkm}$	$\ln Bbl$
Coeficiente	1,048	-0,044	-0,039	0,024	0,005
Erro Padrão	2,485	0,278	0,082	0,122	0,067
Estatística T	0,422	-0,160	-0,475	0,197	0,070
Significância	0,680	0,875	0,642	0,846	0,945
N=19					
R^2 Ajustado	-0,259				
Estatística F	0,075				
Significância F	0,989				
$(n - p)R^2 = (19-1)*(-,259) = -4,662$					