



Universitat Autònoma de Barcelona

EFICIÈNCIA ENERGÈTICA I EFECTE REBOT

DESENVOLUPAMENTS METODOLÒGICS I EVIDÈNCIA EMPÍRICA

TESI DOCTORAL

Gener de 2012

JAUME FREIRE GONZÁLEZ

Doctorat en Economia Aplicada

DIRECTORS:

EMILIO PADILLA ROSA

Departament d'Economia Aplicada
Facultat de Ciències Econòmiques i Empresariales
Universitat Autònoma de Barcelona

IGNASI PUIG VENTOSA

ENT Environment and Management

Amb el suport del Comissionat per a Universitats i Recerca del Departament d'Innovació,
Universitats i Empresa de la Generalitat de Catalunya

Agraïments

Molta gent ha fet possible la realització d'aquest recerca. Voldria agrair a l'Institut Català de l'Energia (ICAEN) i a l'Agència Estatal de Meteorologia per a proporcionar-me part de les dades necessàries per a portar a terme la recerca i al Comissionat per a Universitats i Recerca del Departament d'Innovació, Universitats i Empresa de la Generalitat de Catalunya per a oferir-me finançament per a portar-la a terme. També voldria agrair a l'Emilio Padilla per recolzar-me i acceptar dirigir aquest treball, a l'Ignasi Puig i a tots els companys d'Ent per facilitar-me la feina i donar-me l'oportunitat de continuar els meus estudis, al companys de llicenciatura de la Universitat de Barcelona i als de doctorat del Departament d'Economia Aplicada de la Universitat Autònoma de Barcelona, al professor Josep Lluís Raymond i al Vicent Alcántara pels seus consells, al Juan Carlos Migoya i al personal d'administració del Departament d'Economia Aplicada per la seva eficiència i a tanta d'altra gent que d'una manera o d'una altra m'han ajudat a assolir aquesta fita. Una agraïment especial a la meva família i al meus amics per ser-hi sempre i, sobretot, al suport ofert pels meus pares durant tots aquests anys, sense el qual no hagués arribat fins aquí.

“...Hi ha una confusió total d’idees en pensar que l’ús racional de combustible equival a un consum menor. Ben al contrari ens mostra la realitat...Cada millora produïda en un motor, accelera de nou el consum de carbó...”

William Stanley Jevons (1865), *The Coal Question*

ÍNDEX

Resum	9
Resumen	12
Summary.....	15
1. Introducció	19
1.1. Contextualització	21
1.1.1. Les polítiques d'eficiència energètica i l'efecte rebot.....	21
1.1.2. Inicis i desenvolupament del marc teòric de l'efecte rebot.....	23
1.1.3. Tipus d'efecte rebot	25
1.1.4. Metodologies d'estimació de l'efecte rebot	28
1.2. Objectius.....	30
1.3. Estructura	31
2. Revisió de la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe	35
2.1. Qüestions preliminars sobre l'efecte rebot directe	37
2.2. Revisió de literatura empírica.....	41
2.2.1. Transport privat en vehicles	45
2.2.2. Calefacció domèstica	46
2.2.3. Refrigeració domèstica per a climatització	49
2.2.4. Il·luminació domèstica i no domèstica	50
2.2.5. Altres usos domèstics	53
3. Aspectes teòrics i metodològics de l'efecte rebot directe	55
3.1. La demanda de serveis energètics	57
3.2. L'efecte rebot directe com una elasticitat eficiència de l'energia	60
3.3. L'efecte rebot directe com una elasticitat preu	65
3.3.1. Definicions de l'efecte rebot directe a partir de les elasticitat preu.....	66

3.3.2.	Característiques de l'elasticitat preu de la demanda d'energia.....	70
3.3.3.	Principals problemes de les estimacions amb elasticitats preu de la demanda	72
3.3.4.	La millor aproximació per a determinar la magnitud de l'efecte rebot directe d'un servei energètic.....	75
4.	Estimacions de l'efecte rebot directe per al consum d'electricitat a les llars a Catalunya	79
4.1.	Variables i dades utilitzades	81
4.1.1.	Consum d'energia elèctrica a les llars	82
4.1.2.	Preus de l'energia elèctrica i del gas natural.....	86
4.1.3.	Preu dels aparells de refrigeració domèstica	89
4.1.4.	Variables climàtiques.....	91
4.1.5.	Renda de les llars	94
4.2.	Estimacions de l'efecte rebot directe amb dades agregades de tot Catalunya..	96
4.3.	Estimacions de l'efecte rebot directe del consum d'electricitat a les llars a Catalunya amb dades per municipi	102
4.4.	Resum d'estimacions de l'efecte rebot directe.....	108
5.	Revisió de literatura empírica sobre l'efecte rebot indirecte.....	111
5.1.	Qüestions preliminars sobre l'efecte rebot indirecte	113
5.1.1.	Contingut energètic: consum indirecte d'energia de les mesures de millora de l'eficiència energètica.....	116
5.1.2.	Efectes secundaris: el consum indirecte d'energia per canvis en els patrons de consum	118
5.2.	Revisió de la literatura empírica.....	119
5.2.1.	Efectes sobre tota l'economia: economy-wide effects.....	120
5.2.2.	Efectes indirectes: contingut energètic de les mesures i efectes secundaris.	122
5.2.3.	L'anàlisi Input-output de l'energia	124

6. Aspectes teòrics i metodològics per a l'estimació de l'efecte rebot indirecte.....	129
6.1. Modelització Input-output de l'energia	132
6.1.1. El mètode Input-output per a l'anàlisi de les relacions intersectorials.....	133
6.1.2. L'anàlisi Input-output del consum d'energia i la determinació dels sectors clau en el consum d'energia.....	141
6.2. Modelització <i>re-spending</i>	147
6.2.1. Efectes de les millores d'eficiència sobre els patrons de consum final de les llars i mètodes d'estimació.....	147
6.2.2. Modificació exògena en els patrons de consum a les llars	150
6.2.3. Modificació en els patrons de consum a les llars induïda per una millora de l'eficiència energètica.....	156
 7. Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic del consum d'electricitat a les llars a Catalunya	 161
7.1. Variables i dades utilitzades	163
7.1.1. Balanços energètics i consum sectorial d'electricitat	164
7.1.2. Taules Input-output.....	166
7.1.3. Elasticitats preu de la demanda d'electricitat a les llars	168
7.2. Escenaris per a les simulacions.....	168
7.2.1. Escenari de referència (Ref)	169
7.2.2. Escenari elasticitat renda (ER).....	171
7.2.3. Escenari proporcional (Pro).....	174
7.3. Resultats de les simulacions	176
7.3.1. Millora de l'eficiència del 10%: nous patrons de consum i consum total d'electricitat.....	177
7.3.2. Efecte rebot en els escenaris considerats	187
 8. Anàlisi estructural de les relacions entre eficiència energètica a les llars i estructura productiva	 189
8.1. Escenaris extrems per a una anàlisi estructural de l'efecte rebot	192
8.1.1. Escenari pitjor dels casos (P)	192

8.1.2.	Escenari millor dels casos (M)	193
8.2.	Determinació dels sectors clau en el consum d'energia elèctrica: estimacions per a Catalunya.....	194
8.3.	Resultats de les simulacions	198
8.3.1.	Millora de l'eficiència del 10%: nous patrons de consum i consum total d'electricitat.....	198
8.3.2.	Efecte rebot en els escenaris considerats	204
8.4.	Anàlisi estructural dels escenaris extrems	206
8.4.1.	Anàlisi estructural de les relacions entre efecte rebot i estructura productiva.....	207
8.4.2.	Anàlisi estructural de les relacions entre l'efecte rebot directe i l'efecte rebot indirecte.....	209
9.	L'efecte rebot i les polítiques d'eficiència energètica	213
9.1.	Introducció.....	215
9.2.	Polítiques de control de l'efecte rebot a les llars.....	219
9.2.1.	Sensibilització, informació i comportament del consumidor.....	220
9.2.2.	Instruments normatius	223
9.2.3.	Instruments econòmics	224
9.3.	Els instruments econòmics de control de l'efecte rebot	226
9.3.1.	Consideracions sobre fiscalitat per a adreçar l'efecte rebot directe	226
9.3.2.	Consideracions sobre fiscalitat per a adreçar l'efecte rebot indirecte	228
9.3.3.	L'efecte <i>re-spending</i> de la despesa pública.....	230
10.	Conclusions i futures línies de recerca	233
10.1.	Principals mancances i futures línies de recerca.....	235
10.2.	Conclusions	237
	Referències bibliogràfiques	243
	Annex. Municipis utilitzats a les estimacions de panell i valors estimats dels termes independents individuals del Model d'Efectes Fixos.....	269

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Estimacions de l'efecte rebot directe per ús final del sector domèstic als EUA ...	43
Taula 2. Estudis empírics de l'efecte rebot directe per al transport privat	45
Taula 3. Estudis empírics sobre l'efecte rebot directe de la calefacció domèstica.....	48
Taula 4. Canvis en el preu, l'eficiència i el consum de la il·luminació domèstica, 1800-2000.	51
Taula 5. Resum de definicions de l'efecte rebot directe a partir de l'estimació d'elasticitats	77
Taula 6. Càlcul dels graus-dia calefacció segons la condició que es produeixi.	92
Taula 7. Càlcul dels graus-dia refrigeració segons la condició que es produeixi.	93
Taula 8. Estimació de la demanda total d'energia elèctrica a les llars. Dades agregades de Catalunya.....	99
Taula 9. Estimació de la demanda total d'energia elèctrica per a refrigeració a les llars. Dades agregades de Catalunya.	100
Taula 10. Estimació d'un MEF de la demanda total d'energia elèctrica a les llars incloent-hi el preu del gas. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (<i>cross-section weights</i>).....	104
Taula 11. Estimació d'un MEF de la demanda total d'energia elèctrica a les llars sense incloure el preu del gas. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (<i>cross- section weights</i>)	105
Taula 12. Estimació d'un MCE de la demanda total d'energia elèctrica a les llars. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (<i>cross-section weights</i>).....	107
Taula 13. Estudis d'estimacions de l'efecte rebot sobre tota l'economia a partir de modelització d'equilibri general computable i principals resultats.....	121
Taula 14. Alguns estudis empírics d'anàlisi Input-output de l'energia i qüestió analitzada.	128
Taula 15. Classificació dels sectors econòmics segons la importància en el consum d'energia, atenent els coeficients de Rasmussen.....	146
Taula 16. Consum sectorial d'electricitat a Catalunya, nombre d'abonats i CCAEs, 2005.	165

Taula 17. Patró de consum final de les llars a Catalunya segons escenari. Millora de l'eficiència en electricitat del 10%. Elasticitat preu de la demanda a curt termini. Milers d'€ del 2005.....	179
Taula 18. Patró de consum final de les llars a Catalunya segons escenari. Millora de l'eficiència en electricitat del 10%. Elasticitat preu de la demanda a llarg termini. Milers d'€ del 2005.....	180
Taula 19. Consum total d'electricitat segons escenaris. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a curt termini. En MWh, 2005	182
Taula 20. Percentatge de variació del consum total d'electricitat segons escenari respecte l'escenari de inicial. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a curt termini. En MWh, 2005.....	183
Taula 21. Consum total d'electricitat segons escenaris. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a llarg termini. En MWh, 2005	184
Taula 22. Percentatge de variació del consum total d'electricitat segons escenari respecte l'escenari de inicial. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a llarg termini. En MWh, 2005	185
Taula 23. Variació del consum d'electricitat en els diferents escenaris davant una millora de l'eficiència de l'electricitat del 10%, a les llars a Catalunya, 2005.....	186
Taula 24. Efecte rebot directe i indirecte estàtic per al consum d'electricitat a les llars estimat segons escenari, 2005	187
Taula 25. Coeficients d'arrossegament i d'impuls en el consum d'electricitat a Catalunya, 2005.....	196
Taula 26. Classificació dels sectors econòmics de major a menor coeficient d'arrossegament en el consum d'electricitat a Catalunya 2005.....	197
Taula 27. Patró de consum final de les llars a Catalunya segons escenari. Millora de l'eficiència en electricitat del 10%. Milers d'€ del 2005.	200
Taula 28. Consum total d'electricitat segons escenaris. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. En MWh, 2005	202
Taula 29. Percentatge de variació del consum total d'electricitat segons escenari respecte l'escenari de inicial. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. En MWh, 2005.....	203

Taula 30. Variació del consum total d'electricitat en els escenaris extrems, davant una millora de l'eficiència energètica del 10% a les llars a Catalunya, 2005.....	204
Taula 31. Efecte rebot directe i indirecte estàtic estimats en els escenaris extrems	205
Taula 32. Valors estimats dels efectes individuals de les estimacions del Model d'Efectes Fixos per Catalunya	269

ÍNDEX DE GRÀFICS

Gràfic 1. Classificació dels efectes rebot	28
Gràfic 2. Evolució del percentatge del consum d'energia per a calefacció domèstica sobre el consum total d'energia a les llars a Catalunya, 1997-2005.	47
Gràfic 3. Evolució del percentatge del consum d'energia per a refrigeració domèstica sobre el consum total d'energia a les llars a Catalunya, 1997-2005	49
Gràfic 4. Canvis en l'energia i en la intensitat de la llum per a l'enllumenat públic al Regne Unit, 1920-1995.....	52
Gràfic 5. Evolució del consum anual d'energia elèctrica a les llars catalanes, 1991-2006 .	83
Gràfic 6. Evolució del consum mensual d'energia elèctrica a les llars catalanes, 1998-2007.	84
Gràfic 7. Evolució del consum elèctric per a refrigeració a les llars a Catalunya, 1990-2006	86
Gràfic 8. Evolució de la mitjana anual de la tarifa marginal d'electricitat i de gas natural aplicada a les llars, 1990-2008. Euros constants del 2003.....	88
Gràfic 9. Evolució del preu unitari mitjà dels aparells domèstics d'aire condicionat a Espanya, 1996-2003	90
Gràfic 10. Estacions meteorològiques de les quals es disposa de dades a Catalunya	92
Gràfic 11. Evolució mitjana anual dels graus-dia calefacció i refrigeració a Catalunya, 1990-2003. Mitjana de les estacions meteorològiques seleccionades.....	93
Gràfic 12. Evolució mitjana mensual dels graus-dia calefacció i refrigeració a Catalunya, 1990-2003. Mitjana de les estacions meteorològiques seleccionades	94
Gràfic 13. Evolució de la RFDB a Catalunya, 1990-2003. Base 2000.	96
Gràfic 14. La substitució d'energia per capital i l'impacte en el consum d'energia associat	117
Gràfic 15. Esquema d'una taula Input-output simètrica	134
Gràfic 16. Resultats de l'aplicació del model en els diferents escenaris, Catalunya 2005	206
Gràfic 17. Variació del consum total d'electricitat de l'economia a Catalunya, davant diferents percentatges de millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars, 2005 ...	208
Gràfic 18. Efecte rebot directe i indirecte estàtics del consum d'electricitat a les llars en funció de l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat, Catalunya, 2005	209

RESUM

En aquesta tesi s'ha desenvolupat una recerca teòrica i empírica de l'efecte rebot directe i indirecte causat per les millores d'eficiència energètica, centrada –pel que fa la vessant empírica de la recerca– en les millores d'eficiència en el conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars a Catalunya.

L'efecte rebot directe d'un servei energètic es produeix quan una millora en la seva eficiència energètica no es tradueix en tot l'estalvi energètic que potencialment s'hauria de produir en aquell àmbit. Això és degut a què la millora produeix un abaratiment del cost del servei energètic, que s'acaba traduïnt en una major demanda d'aquest, compensant total o parcialment l'estalvi derivat de la major eficiència. L'efecte rebot indirecte es produeix quan la millora d'eficiència modifica els patrons de consum, produint l'increment en el consum d'altres béns i serveis que també necessiten energia per a ser produïts.

Malgrat hi ha consens entre la comunitat científica sobre el fet que l'efecte rebot existeix, hi ha discrepàncies a l'hora de determinar la seva magnitud. Mentre alguns sostenen que una millora de l'eficiència produeix cert estalvi d'energia, encara que menor que el potencial, altres afirmen que després d'una millora de l'eficiència es produeix un augment net del consum d'energia, produint-se el que a la literatura s'anomena *backfire* (també conegut com a Paradoxa de Jevons o postulat de Khazzoom-Brookes). Un problema clau a l'hora de resoldre aquesta confrontació és que no és possible portar a terme experiments històrics “controlats” per a veure si l'ús energètic és major o menor que si no hi haguessin hagut guanys en l'eficiència energètica.

En primer lloc s'ha realitzat una anàlisi metodològica i empírica de l'efecte rebot directe, a partir de l'estimació d'elasticitats preu de la demanda d'electricitat. Aquesta primera part

ha consistit en una anàlisi de la literatura i dels principals desenvolupaments metodològics, així com en l'especificació i estimació d'un Model d'Efectes Fixos (MEF) combinat amb un model de Mecanisme de Correcció d'Error (MCE), amb dades de panell, que ha proporcionat l'efecte rebot directe a Catalunya per a l'àmbit mencionat.

Mitjançant les tècniques economètriques mencionades s'han obtingut unes estimacions de -0,36 de l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat a curt termini i de -0,49 a llarg termini a Catalunya. També s'ha obtingut una estimació de -0,86 de l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat per a refrigeració a les llars a llarg termini. Això implicaria un efecte rebot directe del 36% a curt termini i del 49% a llarg termini, per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars; i del 86% per a la refrigeració domèstica a llarg termini. Les estimacions per a la refrigeració domèstica no s'han considerat prou concloents, donades les poques observacions amb les que s'han realitzat les estimacions economètriques.

Posteriorment s'ha fet una anàlisi teòrica i empírica de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics per al mateix àmbit, a partir del desenvolupament d'un model Input-output generalitzat de l'electricitat per a Catalunya combinat amb un model *re-spending* que determina els nous patrons de consum a les llars després d'una millora d'eficiència energètica.

En aquesta fase s'han determinats diversos escenaris per a la simulació en els models. S'han construït dos escenaris més probables, un escenari basat en la distribució dels estalvis monetaris assolits per la millora d'eficiència segons les elasticitats renda de cada bé i servei; i un segon basat en una distribució dels mateixos segons la proporció que suposa la despesa del bé o servei sobre el total de despesa a les llars.

Aquests han proporcionat un efecte rebot directe i indirecte estàtic d'entre el 36,57% i el 36,54% en el curt termini i entre el 49,53% i el 49,52% en el llarg termini, el que suposa que una millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars catalanes que hagués de suposar

un estalvi d'electricitat de 10 unitats, acabaria produint un estalvi de 6,4 unitats en el curt termini i de 5,1 unitats en el llarg termini.

A partir d'aquest model i de la construcció d'escenaris extrems, s'han analitzat, des d'una vessant estructural, diversos aspectes rellevants de les relacions entre tecnologia, efecte rebot, consum sostenible, estructura productiva d'una economia i consum de recursos.

Finalment, s'han analitzat breument les principals mesures per a fer front a l'efecte rebot, fent especial èmfasi en els instruments econòmics de fiscalitat ambiental. Aquests instruments es poden dividir principalment en els instruments de sensibilització, informació, els normatius, els instruments econòmics i, en general, aquells que incideixen en el comportament del consumidor.

A part dels desenvolupaments metodològics, els resultats empírics, i les troballes en relació a les interdependències entre tecnologia, consum, estructures productives i tipologies d'efectes rebot, una de les principals conclusions de la recerca és que les polítiques basades en la millora de l'eficiència energètica, orientades a reduir el consum de recursos, les emissions de contaminants i, en definitiva, la lluita contra el canvi climàtic, han d'anar acompanyades de mesures addicionals que contrarestin l'efecte rebot.

Fins i tot en escenaris on l'efecte rebot directe a les llars resulta ser baix, es produeixen altres mecanismes, derivats de la nova despesa dels estalvis monetaris i dels efectes d'una millora de la productivitat sobre el creixement econòmic, que fan que l'efecte rebot total pugui resultar molt elevat, incloent la possibilitat de que es produeixi un increment en el consum d'energia, és a dir, la paradoxa de Jevons.

RESUMEN

En esta tesis se ha desarrollado una investigación teórica y empírica del efecto rebote directo e indirecto causado por las mejoras de la eficiencia energética –centrada, en cuanto a la vertiente empírica de la investigación–, en las mejoras de eficiencia en el conjunto de servicios energéticos que utilizan electricidad en los hogares en Catalunya.

El efecto rebote directo de un servicio energético se produce cuando una mejora en su eficiencia energética no se traduce en todo el ahorro energético que potencialmente debería producirse en ese ámbito. Esto es debido a que la mejora produce un abaratamiento del coste del servicio energético, que se acaba traduciendo en una mayor demanda de éste, compensando total o parcialmente el ahorro derivado de la mayor eficiencia. El efecto rebote indirecto se produce cuando la mejora de eficiencia modifica los patrones de consumo, produciendo el incremento del consumo de otros bienes y servicios que también necesitan energía para ser producidos.

Aunque hay consenso entre la comunidad científica acerca de que el efecto rebote existe, hay discrepancias al determinar su magnitud. Mientras que algunos sostienen que una mejora de la eficiencia produce cierto ahorro de energía, aunque menor que el potencial, otros afirman que después de una mejora de la eficiencia se produce un aumento neto del consumo de energía, produciéndose lo que en la literatura se llama *backfire* (también conocido como Paradoja de Jevons o postulado de Khazzoom-Brookes). Un problema clave para resolver esta confrontación es que no es posible llevar a cabo experimentos históricos "controlados" para ver si el uso energético es mayor o menor que si no hubiera habido ganancias en la eficiencia energética.

En primer lugar se ha realizado un análisis metodológico y empírico del efecto rebote directo, a partir de la estimación de elasticidades precio de la demanda de electricidad.

Esta primera parte ha consistido en un análisis de la literatura y de los principales desarrollos metodológicos, así como en la especificación y estimación de un Modelo de Efectos Fijos (MEF) combinado con un modelo de Mecanismo de Corrección de Error (MCE) con datos de panel, que ha proporcionado el efecto rebote directo en Catalunya para el ámbito mencionado.

Mediante las técnicas econométricas mencionadas se han obtenido unas estimaciones de -0,36 de la elasticidad precio de la demanda de electricidad a corto plazo y de -0,49 a largo plazo, en Catalunya. También se ha obtenido una estimación de -0,86 de la elasticidad precio de la demanda de electricidad para refrigeración en los hogares a largo plazo. Esto implicaría un efecto rebote directo del 36% a corto plazo y del 49% a largo plazo, para el conjunto de servicios energéticos que utilizan electricidad en los hogares, y del 86% para la refrigeración doméstica a largo plazo. Las estimaciones para la refrigeración doméstica no se han considerado suficientemente concluyentes, dadas las pocas observaciones con las que se han realizado las estimaciones econométricas.

Posteriormente se ha hecho un análisis teórico y empírico del efecto rebote directo e indirecto estáticos para el mismo ámbito, a partir del desarrollo de un modelo Input-output generalizado de la electricidad para Catalunya combinado con un modelo *responding*, que determina los nuevos patrones de consumo en los hogares después de una mejora de eficiencia energética.

En esta fase se han determinado diversos escenarios para la simulación en los modelos. Se han construido dos escenarios más probables, un escenario basado en la distribución de los ahorros monetarios logrados por la mejora de eficiencia según las elasticidades renta de cada bien y servicio, y un segundo basado en una distribución de los mismos según la proporción que supone el gasto del bien o servicio sobre el total de gasto.

Estos han proporcionado un efecto rebote directo e indirecto estático de entre el 36,57% y el 36,54% en el corto plazo y entre el 49,53% y el 49,52% en el largo plazo, lo que

supone que, una mejora de la eficiencia de la electricidad en los hogares catalanes que debiera suponer un ahorro de electricidad de 10 unidades, acabaría produciendo un ahorro de 6,4 unidades en el corto plazo y de 5,1 unidades en el largo plazo.

A partir de este modelo y de la construcción de escenarios extremos, se han analizado, desde una vertiente estructural, varios aspectos relevantes de las relaciones entre tecnología, efecto rebote, consumo sostenible, estructura productiva de una economía y consumo de recursos.

Finalmente, se han analizado brevemente las principales medidas para hacer frente al efecto rebote, haciendo especial énfasis en los instrumentos económicos de fiscalidad ambiental. Estos instrumentos se pueden dividir principalmente en los instrumentos de sensibilización e información, los normativos y los instrumentos económicos, y en general aquéllos que inciden en el comportamiento del consumidor.

Aparte de los desarrollos metodológicos, los resultados empíricos, y los hallazgos en relación a las interdependencias entre tecnología, consumo, estructuras productivas y tipologías de efectos rebote, una de las principales conclusiones de la investigación es que las políticas basadas en la mejora de la eficiencia energética, orientadas a reducir el consumo de recursos, de las emisiones de contaminantes y, en definitiva, de la lucha contra el cambio climático, deben ir acompañadas de medidas adicionales que contrarresten el efecto rebote.

Incluso en escenarios donde el efecto rebote directo a los hogares resulta ser bajo, se producen otros mecanismos, derivados del nuevo gasto procedente de los ahorros monetarios y de los efectos de una mejora de la productividad sobre el crecimiento económico, que hacen que el efecto rebote total pueda resultar muy elevado, incluyendo la posibilidad de que se produzca un incremento en el consumo global de energía, es decir, la paradoja de Jevons.

SUMMARY

This thesis has developed a theoretical and empirical research of direct and indirect rebound effect of energy efficiency, focusing, as regards the empirical research, on efficiency improvements in the overall energy services using electricity in households in Catalonia.

The direct rebound effect of an energy service occurs when an improvement in energy efficiency does not translate into all the energy savings that potentially should occur in that area. This is because the improvement causes a reduction of the cost of the energy service, translated into greater demand, totally or partially offsetting the savings derived from greater efficiency. The indirect rebound effect occurs when the efficiency improvement leads to shifts in consumption patterns, producing an increase in the consumption of other goods and services that also need energy to be produced.

Although there is consensus among the scientific community about the fact that the rebound effect exists, there are discrepancies in determining its magnitude. While some of them argue that an improvement in energy efficiency produces some energy savings, although less than the potential, others say that after an efficiency improvement there is a net increase of energy consumption, resulting in what the literature calls *backfire* (also known as the Jevons Paradox or the Khazzoom-Brookes postulate). A key problem in solving this conflict is that it is not possible to carry out historical "controlled" experiments to see if energy use is higher or lower than it would had been, if gains in energy efficiency had not occurred.

Firstly, it has been made a methodological and empirical analysis of the direct rebound effect, from the estimation of price elasticities for electricity demand. The first part consists of an analysis of the literature and an analysis of the major methodological

developments, as well as the specification and estimation of a Fixed Effects Model (FEM) combined with an Error Correction Mechanism model (ECM) using panel data, that provided the direct rebound effect in Catalonia for the mentioned area.

Using the mentioned econometric techniques, estimates have been obtained of -0.36 for price elasticity of electricity demand in the short term and -0.49 in the long-term, in Catalonia. An estimate of -0.86 for long term price elasticity of electricity demand for cooling in households has also been obtained. This would imply a direct rebound effect of 36% in the short term and 49% in the long term, for all energy services that use electricity in households, and 86% for domestic refrigeration in the long term. Estimates for domestic refrigeration are not considered conclusive, since insufficient observations were available for the econometric estimates.

Subsequently, a theoretical and empirical analysis of direct and indirect rebound effect for the same static field has been done, from the development of a generalized input-output model for electricity in Catalonia, combined with a *re-spending* model that determines new consumption patterns in households, after an energy efficiency improvement.

At this stage, various scenarios have been determined for the simulations. Two most likely scenarios have been built. One based on the distribution of monetary savings achieved by improving efficiency in function of income elasticities for each good and service; and a second one, based on a distribution of them accordingly to the proportion that represent each good or service over the total household expenditure.

These have provided static direct plus indirect rebound effect between 36,57% and 36,54% in the short term, and between 49,53% and 49,52% in the long term, which means that an energy efficiency improvement of electricity in Catalan households expected to save 10 units of electricity, would finally mean savings of 6,4 units in the short term and 5.1 units in the long run.

From this model, and the construction of extreme scenarios, several important aspects of the relationship between technology, rebound effect, sustainable consumption, production structure of an economy and consumption resources, have been analyzed from a structural perspective.

Finally, the main measures to deal with the rebound effect have been briefly analyzed, with special emphasis on economic instruments for environmental taxation. These instruments can be mainly divided into awareness and information instruments, and those that generally affect consumer behavior, regulatory, and economic instruments.

Apart from the methodological developments, the empirical results, and the findings regarding the interdependencies between technology, consumption, production structures and types of rebound effects, one of the main conclusions of the research is that policies based on improving the energy efficiency aimed at reducing resource consumption, emissions of pollutants and, ultimately, to fight against climate change must be accompanied by additional measures to counteract the rebound effect.

Even in scenarios where the direct rebound effect in households is low, there are other mechanisms from the new expenditure of monetary savings, and effects of improved productivity on economic growth, which may cause a very high total rebound effect, including the possibility of an increased of overall energy consumption, ie, the Jevons paradox.

Capítol 1

INTRODUCCIÓ

1.1. Contextualització

1.1.1. Les polítiques d'eficiència energètica i l'efecte rebot

Dins de les polítiques de reducció de les emissions de carboni per a reduir el consum d'energia i mitigar els efectes del canvi climàtic prenen especial rellevància les polítiques de millora de l'eficiència energètica (IPCC, 2007). Aquestes han estat impulsades pel propi mercat i des dels poders públics i han estat considerades una prioritat a l'hora de dissenyar les polítiques ambientals. S'espera que una política activa de millora de l'eficiència energètica provoqui una reducció del consum energètic i, en darrer terme, de les emissions contaminants.

Aquesta reducció del consum energètic que a curt termini podria produir-se, tal i com un càlcul d'enginyeria preveuria, normalment no té en consideració altres aspectes, que es produeixen en el mitjà i llarg termini i que poden provocar que la política de millora de l'eficiència no es tradueixi en els resultats esperats en termes de reducció del consum total d'energia. Les reduccions potencials de consum d'energia, i consegüentment les emissions resultants, es poden veure minvades pel denominat "efecte rebot".

Efecte rebot és el terme utilitzat per a descriure els mecanismes que uns menors costos en els "serveis energètics",¹ deguts a una millora de l'eficiència, provoquen sobre el comportament dels consumidors, ja sigui de manera individual o a nivell agregat. L'efecte es pot traduir en més hores d'utilització del servei energètic, més consumidors utilitzant-lo o en una major qualitat del mateix. Això provoca que la reducció inicial prevista de

¹ Servei energètic d'un bé és el servei que proporciona a través del consum d'energia, i és, de fet, el que demanda el consumidor. Per exemple: el bé estufa, proporciona el servei energètic calefacció; el bé aparell d'aire condicionat, refrigeració; etc. La producció d'aquests serveis requereix energia, però també requereix l'input de capital, treball i la gestió experta de les llars o les empreses (Greening *et al.*, 2000).

consum d'energia es vegi en part compensada o fins i tot pugui veure's incrementada.

És àmpliament acceptat pels economistes que tracten temes d'energia l'existència de l'efecte rebot. La principal controvèrsia rau en la identificació de les fonts que el provoquen i sobretot en el seu abast real (Greening *et al.*, 2000).

Aquest aspecte (el de la magnitud) resulta de vital importància, ja que la major part de polítiques de millora de l'eficiència energètica es basen en la premissa que l'increment de l'eficiència energètica porta a un consum energètic total menor i, per tant, a unes menors emissions de gasos amb efecte d'hivernacle.

Aquesta premissa resultaria certa si la magnitud de l'efecte rebot fos menor del 100%. En aquest cas les millores d'eficiència energètica aconseguides conduirien a un menor consum d'energia. En el cas que l'efecte rebot fos major del 100%, el consum energètic final seria major que l'inicial, fent que la política de millora de l'eficiència resultés contraproductiva. Quan aquest efecte és major del 100%, és a dir, quan la millora de l'eficiència genera un augment net de l'ús del recurs, l'efecte rebot s'anomena "backfire", produint-se la denominada paradoxa de Jevons (Jevons, 1865), o postulat de Khazzoom-Brookes (Saunders, 1992).

Un aspecte clau per a determinar la magnitud de l'efecte rebot és com es defineix, ja que en funció d'això l'efecte pot ser insignificant, com argumenten diversos autors, pel fet que l'energia representa una petita proporció dels costos totals dels serveis energètics (Lovins *et al.*, 1988; Lovins, 1998; Schipper i Grubb, 2000), o resultar en un increment important de l'ús del recurs (Herring, 2006; Grubb *et al.*, 1995 i Brookes, 1990, 1992, 1993 i 2000). Conseqüentment, el coneixement de les causes i el seu tamany resultaria particularment rellevant per a dissenyar i implementar un conjunt efectiu de polítiques de reducció del consum de recursos i, en el cas del consum d'energia, de les emissions de carboni.

1.1.2. Inicis i desenvolupament del marc teòric de l'efecte rebot

El debat entre economistes sobre els efectes del desenvolupament tecnològic que millora en l'eficiència d'un recurs, sobre el consum del propi recurs, és llarg. Molts economistes reconeixen el treball d'un dels fundadors de l'economia de l'energia: William Stanley Jevons (1835-1882) qui, en el seu treball clàssic "*The Coal Question*", publicat per primer cop al Regne Unit l'any 1865, va argumentar que hi havia una confusió d'idees per a suposar que l'ús racional dels combustibles portava a que se'n fes un consum menor. Ell afirmava que el que succeïa en realitat era tot el contrari.

Jevons posava l'exemple de com la reducció del consum de carbó per tona de ferro a menys d'un terç, va ser seguit, a Escòcia, per un increment total d'unes deu vegades del consum de carbó entre els anys 1830 i 1863, així com de l'efecte indirecte del ferro barat en accelerar el creixement d'altres branques de la indústria consumidores de carbó. Així, Jevons va posar els fonaments de la idea que l'efecte rebot, en els mercats energètics, resultava major del 100%.

La crisi energètica produïda durant els anys 70 del segle XX va fer que les qüestions referides al consum i a l'eficiència energètiques tornessin a agafar força. En aquest context, les reivindicacions de què incrementar l'eficiència energètica conduiria a un consum nacional menor van tornar a ser qüestionades per Brookes (1979). Aquest va criticar en un estudi un treball de Leach *et al.* (1979) a l'hora d'estimar els estalvis d'energia al Regne Unit, per errors en la consideració de factors macroeconòmics. Posteriorment a principis dels 80, Khazzoom (1980) va realitzar una crítica similar d'un treball de Lovins (1977). Les crítiques de Brookes i de Khazzoom van ser batejades com el Postulat de Khazzoom-Brookes (KB) per l'economista Saunders (1992).

El terme "efecte rebot" va ser aplicat per primera vegada per Daniel Khazzoom, a l'increment directe de la demanda d'un servei energètic, el subministrament del qual

havia incrementat com a conseqüència de millores en l'eficiència tècnica en l'ús d'energia (Khazzoom, 1980, 1982, 1987, 1989; Khazzoom i Miller, 1982). De manera gairebé simultània, Len Brookes definia l'efecte rebot en termes generals, incloent-hi els efectes sobre tota l'economia (*economy-wide effects*) (Brookes, 1978).

El debat es va fer més intens a principis dels 90, alimentat per la creixent preocupació per l'escalfament global i el debat polític del rol de l'eficiència energètica. En gran part, aquest va ser canalitzat a través de les pàgines de les revistes científiques *Energy Policy* i *Energy Journal*, però també difós per les pàgines del *New York Times* a finals de 1994 i per la revista científica del Regne Unit *New Scientist* l'any 1998. Tot aquest debat va culminar en dos números especials de dues revistes l'any 2000, dedicades a diferents aspectes de l'efecte rebot: per una banda la revista *Energy Policy*, editada per Lee Schipper, i per altra, la revista *Energy and Environment*, editada per Horace Herring, en les quals contribuïren molts dels protagonistes d'aquest debat.

En aquest context, i un cop assumida l'existència de l'efecte rebot, aparegueren dues posicions enfrontades respecte de la quantificació de la magnitud de l'efecte rebot. Aquestes es poden resumir de la següent manera:

- Per una banda, aquells que pensen que el consum posterior d'energia és major que si no hi hagués hagut millora d'eficiència, és a dir, que es produeix *backfire* (posició bàsicament mantinguda per Len Brookes, i sota determinades circumstàncies per Harry Saunders). (Brookes, 1978; Saunders, 1992).
- Per altra banda, aquells que defensen que el consum d'energia és menor que si no hi ha hagués hagut millora d'eficiència (posició mantinguda per Lee Schipper i altres autors). (Schipper i Grubb, 2000).

Cada postura ha defensat les seves afirmacions amb una combinació d'arguments teòrics i observacions empíriques basades principalment en dades històriques del consum

d'energia.

Un problema clau per a resoldre la confrontació entre les dues postures és que no és possible portar a terme un experiment “controlat” que mostri si l'ús d'energia és major o menor que si no hi haguessin hagut millores d'eficiència. Això és degut a que a les economies del món real, la relació entre un canvi en la productivitat energètica i el subsegüent canvi en el consum energètic es produeix a través d'una gran quantitat de variables confuses i sovint inobservables. Aquestes variables poden incloure des d'aspectes socials, polítics, ambientals, antropològics o psicològics.

1.1.3. Tipus d'efecte rebot

Es poden identificar a la literatura, com a mínim, tres tipus d'efecte rebot que engloben dues visions, la microeconòmica i la macroeconòmica (Greening *et al.*, 2000; Dimitropoulos i Sorrell, 2006; Sorrell, 2007):

1. Efecte rebot directe: quan la millora de l'eficiència energètica per a un servei energètic particular fa disminuir el cost efectiu d'aquest servei, el que portarà posteriorment a un increment del seu consum.

L'efecte rebot directe es pot descompondre, pel que fa als consumidors en:

- Efecte substitució: a partir de substituir el consum de béns i serveis pel consum (més barat) del servei energètic que ha estat objecte d'una millora de l'eficiència energètica, mantenint constant el nivell de satisfacció del consumidor.
- Efecte renda: l'increment produït en la renda real aconseguit per la millora de l'eficiència energètica permet assolir un major nivell “d'utilitat” per un

major consum de tots els béns i serveis, incloent-hi el mateix servei energètic.

De la mateixa manera, per als productors es pot descompondre en:

- Efecte substitució: a partir de substituir l'ús de capital, treball i matèries primeres pel servei energètic més barat, mantenint un nivell constant d'output.
- Efecte output: els estalvis de costos produïts per la millora d'eficiència energètica permeten produir un major nivell d'output, el que incrementa el consum de tots els inputs, incloent-hi el servei energètic.

En els capítols 2, 3 i 4 s'analitza a fons l'efecte rebot directe a les llars i es realitzen estimacions per a Catalunya.

2. Efecte rebot indirecte: el menor cost efectiu del servei energètic pot comportar canvis en les demandes d'altres béns, serveis i factors productius que també requereixen energia per a la seva provisió.

L'efecte rebot indirecte es pot alhora descompondre en:

- Contingut energètic (*embodied energy*): és el consum energètic indirecte necessari per a aconseguir la millora d'eficiència energètica, com l'energia requerida per a produir i instal·lar un aïllament tèrmic.
- Efectes secundaris: és l'energia associada a l'increment en el consum d'altres béns i serveis com a conseqüència de la millora d'eficiència energètica. Part de la recerca portada a terme en aquesta tesi se centra en desenvolupaments metodològics i estimacions empíriques d'aquesta

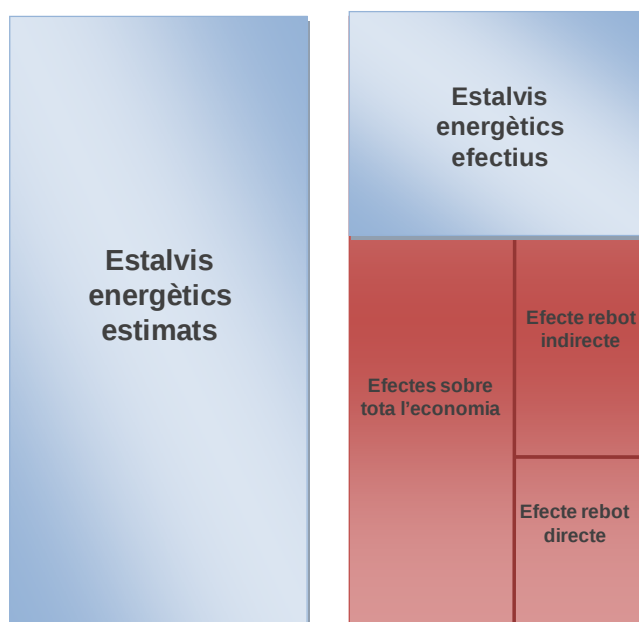
tipologia d'efecte rebot indirecte.

En els capítols 5, 6, 7 i 8 s'analitza a fons l'efecte rebot indirecte i es desenvolupa un model Input-output generalitzat de l'energia que permet estimar els efectes secundaris a partir de realitzar simulacions per a les llars per a Catalunya.

3. Efectes sobre tota l'economia (*economy wide effects*): una caiguda del preu efectiu d'un servei energètic redueix el preu de béns intermedis i finals a través de tota l'economia portant a una sèrie d'ajustaments de preus i quantitats, amb els sectors intensius en l'ús d'energia com a més beneficiats a expenses dels sectors menys intensius en el seu ús. Les millores també reduirien els preus de l'energia impulsant el creixement econòmic, el que incrementaria el consum energètic. Aquesta tipologia d'efecte rebot queda fora de l'abast d'aquesta tesi.

El Gràfic 1 mostra la classificació dels diferents tipus d'efectes rebot (suposant la no existència de *backfire*, considerant que sí que s'assolirien estalvis energètics).

Gràfic 1. Classificació dels efectes rebot



Font: elaboració pròpia a partir de Sorrell (2007).

L'efecte rebot directe només se centra en l'anàlisi dels efectes sobre un servei energètic (visió microeconòmica), mentre que, tant l'efecte rebot indirecte com els efectes sobre tota l'economia, avaluen els efectes d'una millora de l'eficiència energètica des d'una perspectiva macroeconòmica.

1.1.4. Metodologies d'estimació de l'efecte rebot

La literatura empírica sobre l'efecte rebot es pot resumir en sis tipologies bàsiques d'estudis:

1. Estudis d'avaluació: Consisteixen en la realització d'avaluacions a nivell microeconòmic de l'impacte de millores de l'eficiència energètica específiques sobre la demanda d'energia o de serveis energètics (Hartman, 1988; Train, 1994; Frondel i Schmidt, 2005; Sanders i Philipson, 2006).

2. Estudis de modelatge economètric: Es realitzen a partir de la utilització de fonts de dades secundàries per a realitzar estimacions d'elasticitats de la demanda d'energia o de serveis energètics específics a diversos nivells d'agregació (Khazzoom, 1980; Berkhout *et al.*, 2000; Binswanger, 2001; Greene *et al.*, 1999a).
3. Estudis d'elasticitats de substitució: Consisteixen en la realització d'estimacions de l'elasticitat de substitució entre energia i capital a diversos nivells d'agregació (Miller, 1986; Stern, 2004; Frondel, 2004).
4. Estudis de Modelatge d'Equilibri General Computable (MEGC): desenvolupament de models macroeconòmics d'equilibri general. Aquests models permeten realitzar una simulació d'impactes contemplant els efectes sobre tota l'economia (*economy-wide effects*) (Lenzen, 1998; Allan *et al.*, 2006; Barker i Foxon, 2006).
5. Estudis de modelatge macroeconomètric: Aquest tipus d'estudis són similars als del punt anterior, però amb la utilització de models econòmics per a l'estimació de determinats paràmetres del model macroeconòmic (Barker *et al.*, 2007; Junankar *et al.*, 2007).
6. Estudis d'energia, productivitat i creixement econòmic: Corresponen a un conjunt d'estudis empírics que inclouen estudis sobre història econòmica (Fourquet i Pearson, 2006; Richmond i Kaufmann, 2006), teoria de producció neoclàssica (Saunders, 2007), economia ecològica (Stern, 2000), anàlisi de descomposició (Schipper i Grubb, 2000) i anàlisi Input-output (Sartori i Hestnes, 2007).

Les dues primeres tipologies d'estudis corresponen a l'evidència existent sobre l'efecte rebot directe, mentre que els quatre darrers corresponen a l'evidència sobre l'efecte rebot indirecte i sobre tota l'economia (*economy-wide effects*). Són els últims, els que bàsicament inclouen l'evidència sobre l'existència de "backfire" (Sorrell, 2007).

En la primera part de la present recerca (centrada en l'efecte rebot directe), l'anàlisi de la literatura empírica se centra principalment en el segon punt, és a dir, en els estudis de modelatge economètric, donat que un dels objectius és l'estimació de l'efecte rebot directe per a un servei energètic particular a partir de dades secundàries, amb l'aplicació de tècniques economètriques. Posteriorment, l'anàlisi de la literatura empírica se centrarà principalment en el quart, cinquè i sisè punts, ja que un dels principals objectius d'aquesta recerca és l'estimació de l'efecte rebot indirecte a partir de metodologies Input-output.

1.2. Objectius

El principal objectiu d'aquesta tesi és desenvolupar una metodologia i contrastar la hipòtesi d'existència d'un efecte rebot directe i indirecte per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars a Catalunya, així com obtenir estimacions empíriques de la magnitud de l'efecte rebot directe i indirecte produït a Catalunya per les millores d'eficiència energètica que es produeixen en els serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars. També es fa una breu aportació a possibles polítiques i instruments econòmics per tal de pal·liar-lo.

Aquest és un àmbit on, com es mostrarà, hi ha poca evidència empírica, i no es coneix cap estudi de característiques similars a nivell de Catalunya o Espanya.²

Els objectius específics de la tesi s'enumeren a continuació:

Objectiu 1: Desenvolupament d'una metodologia d'estimació de l'efecte rebot directe a partir de dades de panell amb mètodes economètrics. Desenvolupament de mètodes més

² Tot i que hi ha dos estudis sobre l'efecte rebot a Espanya que l'avaluen a partir de models d'equilibri general computable: Cardenete et al. (2008) i Guerra (2009).

robustos que els existents en la literatura per a l'estimació de l'efecte rebot directe.

Objectiu 2: Estimació de la magnitud de l'efecte rebot directe per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars a Catalunya.

Objectiu 3: Desenvolupament d'una metodologia d'estimació de l'efecte rebot indirecte a les llars a partir d'estimacions de l'efecte rebot directe, amb la utilització de mètodes d'anàlisi Input-output de l'energia i modelització *re-spending*.

Objectiu 4: Estimació de la magnitud de l'efecte rebot directe més indirecte estàtics per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars a Catalunya.

Objectiu 5: Anàlisi estructural de les relacions entre el progrés tecnològic que millora l'eficiència energètica a les llars, els patrons de consum final de les mateixes, l'estructura productiva i el consum energètic.

Objectiu 6: Identificació de les principals polítiques i instruments econòmics per al control de l'efecte rebot.

1.3. Estructura

A continuació es mostra l'estructura de la recerca portada a terme.³

1. Introducció

³ Una versió resumida dels capítols dedicats a l'efecte rebot directe, es pot trobar a Freire-González (2010), mentre que una versió resumida dels capítols sobre l'efecte rebot indirecte es pot trobar a Freire-González (2011a).

Aquest capítol conté una introducció a la recerca que es portarà a terme, els principals conceptes que s'aniran desenvolupant al llarg de la mateixa i els seus principals objectius.

2. Revisió de la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe

En aquest capítol, després de la consideració d'un seguit de qüestions preliminars a tenir en compte en les estimacions de l'efecte rebot directe, es desenvolupa una exhaustiva revisió de la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe a les llars, que contextualitza l'estat de la qüestió. Es fa un repàs dels principals treballs empírics en l'àmbit del transport privat, la calefacció i la refrigeració domèstiques, la il·luminació i altres usos domèstics.

3. Aspectes teòrics i metodològics de l'efecte rebot directe

Aquest capítol està dedicat als principals desenvolupaments teòrics, definicions i aproximacions per a l'obtenció de l'efecte rebot directe així com als aspectes metodològics a tenir en compte per a la realització de les estimacions econòmriques sobre l'efecte rebot directe a les llars que es porten a terme.

4. Estimació de l'efecte rebot directe per al consum d'electricitat a les llars a Catalunya

En aquest capítol es procedeix, en primer terme, a la descripció de les variables i dades necessàries per a portar a terme les estimacions. Posteriorment a l'especificació i estimació a partir de mètodes econòmrics de l'efecte rebot directe per les millores d'eficiència de l'electricitat a les llars a Catalunya.

5. Revisió de literatura empírica sobre l'efecte rebot indirecte

En primer terme es realitza una introducció a les qüestions preliminars a tenir en compte

per a l'estimació de l'efecte rebot indirecte. Posteriorment es desenvolupa una exhaustiva revisió de la literatura empírica sobre el mateix centrada en aquella que utilitza modelització Input-output ambiental, per a contextualitzar l'estat de la qüestió.

6. Aspectes teòrics i metodològics per a l'estimació de l'efecte rebot indirecte

Aquest capítol està dedicat als principals desenvolupaments teòrics i als aspectes metodològics utilitzats en la recerca. Per a aproximar-se a l'efecte rebot directe i indirecte estàtics s'ha desenvolupat un model Input-output de l'energia que permet observar les necessitats directes i indirectes de tota l'estructura productiva en termes d'energia, davant de variacions de la demanda final dels diversos sectors econòmics. Aquest s'ha combinat amb un model *re-spending*.

7. Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic del consum d'electricitat a les llars a Catalunya

En aquest capítol es porten a terme les estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics a les llars a Catalunya a partir dels models desenvolupats amb dades de Catalunya. Es construeixen dos escenaris més probables per a realitzar les simulacions en els models.

8. Anàlisi estructural de les relacions entre eficiència energètica a les llars i estructura productiva

Aquest capítol conté una anàlisi estructural de les relacions entre l'efecte rebot a les llars i el sistema productiu. Per a fer-ho, es construeixen uns escenaris extrems que permeten establir uns límits superiors i inferiors a l'efecte rebot directe més indirecte estàtics, donada una estructura productiva.

9. L'efecte rebot i les polítiques d'eficiència energètica

Aquest capítol aborda una discussió dels principals instruments disponibles per a controlar l'efecte rebot. La discussió se centra en els principals instruments econòmics disponibles des d'un punt de vista teòric, focalitzant-se en els instruments de caràcter fiscal.

10. Conclusions i futures línies de recerca

A partir dels resultats obtinguts en la recerca, es treuen les principals conclusions, fortaleeses i debilitats de la recerca duta a terme, així com possibles futures línies de recerca derivades de la mateixa.

Capítol 2

REVISIÓ DE LA LITERATURA EMPÍRICA SOBRE L'EFECTE REBOT DIRECTE

En aquest capítol s'analitzen en primer terme algunes qüestions preliminars que cal entendre sobre l'efecte rebot directe per a contextualitzar-lo, així com determinats aspectes que cal tenir en compte a l'hora de realitzar estimacions.

Posteriorment es realitza una exhaustiva revisió de la literatura empírica existent sobre efecte rebot directe per als diferents serveis energètics que hi ha a les llars.

2.1. Qüestions preliminars sobre l'efecte rebot directe

L'efecte rebot directe, a diferència de l'efecte rebot indirecte i l'efecte rebot sobre tota l'economia, és l'increment en el consum d'un servei energètic particular degut a una millora de l'eficiència energètica produïda en aquell mateix servei energètic, és a dir, no es consideren altres aspectes com efectes col·laterals sobre altres consums o serveis energètics.

La gran varietat de definicions utilitzades a la literatura econòmica de l'efecte rebot directe, van ser brillantment resumides i analitzades per Berkhout *et al.* (2000), Dimitropoulos i Sorrell (2006) i Sorrell (2007), entre d'altres.

La divergència d'opinions sobre la magnitud d'un fet empíric com és l'efecte rebot, mencionada a l'apartat 1.1.2, és bàsicament deguda, als tres factors citats a continuació (Sorrell, 2007):

1. Els diversos autors utilitzen diferents definicions d'efecte rebot, amb diferents definicions sobre les qüestions associades, com els límits rellevants del sistema. No és el mateix analitzar l'efecte rebot acotant els efectes a un àmbit concret que analitzant com es difon cap a tot el sistema socioeconòmic, etc.

2. L'evidència empírica de l'efecte rebot és suficientment escassa, ambigua i inconclusiva per estar oberta a una àmplia varietat d'interpretacions.
3. Els supòsits fonamentals sobre com opera l'economia estan en discussió. Aquests poden afectar de manera substancial a les estimacions que es realitzin sobre l'efecte rebot.

L'evidència empírica sobre l'efecte rebot directe és incomplerta, principalment focalitzada en un limitat nombre de serveis energètics com el transport privat i la calefacció de les llars (són els dos àmbits on es troba més evidència empírica). Aquesta també està principalment centrada en estudis realitzats dels Estats Units i el Regne Unit.

Tot i que hi ha estudis concrets per a altres països, hi ha una clara mancança d'estudis empírics per a altres realitats geogràfiques, especialment per a països menys industrialitzats, on el diferent estadi de desenvolupament econòmic en el que es troben immersos, podria produir una variació significativa de la magnitud de l'efecte rebot en les estimacions. Malgrat que algun estudi apunta cap aquí (Roy, 2000), la manca d'evidència empírica no permet ser concloents.

Com s'ha indicat al capítol 1, els treballs empírics existents sobre l'efecte rebot directe provenen dels estudis d'avaluació i de les estimacions economètriques a partir de fonts secundàries de dades. Donat que aquesta recerca se centra en la segona estratègia d'estimació, a continuació es consideren els principals aspectes clau que afecten les estimacions economètriques i la magnitud de l'efecte rebot directe per a un servei energètic (Sorrell, 2007):

1. Identificació i mesura de la variable endògena: L'origen de l'efecte rebot és un increment del consum d'un servei energètic com a conseqüència d'una millora de l'eficiència, però la mesura d'un servei energètic és molt difícil d'obtenir. Per

exemple, en el cas de la calefacció i refrigeració de les llars, una mesura adequada de servei energètic seria el “confort tèrmic”, però aquesta depèn d'un rang de variables, que no són mesurables en la seva totalitat. Com es veurà en capítols posteriors, una aproximació útil és mesurar el consum d'energia utilitzada per a obtenir el servei energètic, però en aquest cas també és necessari disposar de dades del consum energètic utilitzat només per al servei energètic analitzat, separat de la resta d'usos.

2. Identificació i mesura de les variables exògenes: Encara que la variable dependent sigui mesurable, pot succeir que no existeixin dades de la resta de variables que l'afecten, especialment dades d'eficiència energètica. Una alternativa utilitzada, com es veurà en posteriors capítols, és la d'utilitzar el preu de l'energia o del servei energètic. “L'equació de Khazzoom” (Khazzoom, 1980) proporciona un marc per a l'estimació de l'efecte rebot a partir de l'elasticitat preu de la demanda d'un servei energètic, però com es veurà, els supòsits implícits que comporta poden portar a la sobreestimació de l'efecte rebot. També s'ha de disposar de mesures d'altres variables, com la renda, les condicions climàtiques, etc. que afecten el consum d'energia i que també han d'incorporar-se com a variables de control en les estimacions economètriques.
3. Atributs del servei energètic: Pot succeir que una millora de l'eficiència energètica per a un servei energètic particular no provoqui una reducció del seu cost per al consumidor, però de manera indirecta, produeixi una millora dels seus atributs. Per exemple, en el cas dels vehicles privats, la millora d'eficiència pot portar a produir vehicles més potents, més grans, més confortables, amb millors característiques, utilitzant la mateixa quantitat d'energia per a recórrer els mateixos quilòmetres. La millora dels atributs d'un servei energètic reduiria la magnitud de l'efecte rebot en les estimacions, si no es tenen en consideració.
4. Consumidors marginals: Donat que una part important de l'efecte rebot ve donada per aquells “consumidors marginals”, que anteriorment no podrien accedir al servei

energètic i que per la millora d'eficiència produïda, i la consegüent reducció del cost, ara sí que poden, la gran quantitat de "consumidors marginals" en els països en desenvolupament fa que, per aquesta via, els potencials rebots en aquells contextos siguin majors (Wirl, 1997).

5. Efecte "saciació": Hi ha un altre aspecte que pot fer que els nivells de renda siguin importants a l'hora de determinar la magnitud de l'efecte rebot i que, per tant, faci que els rebots siguin majors en països econòmicament menys desenvolupats. L'efecte "saciació" d'un servei energètic es produeix quan l'augment del consum energètic per part del consumidor és cada cop menor degut a que aquest es troba a prop de la seva saciació. Aquest fet es pot veure clarament, per exemple en el consum de refrigeració o calefacció. El consum d'energia per a refrigeració augmentarà molt en primer terme, però no ho farà tant a mesura que la temperatura de la llar del consumidor s'acosti al seu nivell màxim de confort tèrmic (Boardman i Milne, 2000; Crujpers, 1995, 1996). Donat que per a la majoria de serveis energètics, els països en desenvolupament es troben més allunyats a la seva saciació, l'efecte rebot resultaria de major magnitud (Roy, 2000). Dins els països més industrialitzats, en aquelles llars amb rendes més baixes, també pot produir-se un efecte rebot més elevat pel fet que estan més allunyats de la seva saciació (Hong *et al.*, 2006).
6. Millora de l'eficiència sobre la resta de costos del servei energètic: L'efecte rebot serà menor si les noves tecnologies, més eficients, que proveeixen el servei energètic són més cares que les alternatives menys eficients, ja que per aquesta via es podria compensar la reducció del cost del servei energètic que suposa la millora de l'eficiència, i viceversa. A la pràctica, molts equipaments presenten alhora una millora de l'eficiència energètica i una reducció del seu cost en relació als nivells de renda al llarg del temps (Sorrell, 2007).
7. Irreversibilitat de les millores d'eficiència: les elasticitats preu de l'energia no són simètriques al llarg del temps i tendeixen a ser majors per a períodes amb increments

dels preus de l'energia que amb decrements d'aquests preus (Kouris, 1982; Gately, 1992, 1993; Dargay, 1992; Dargay i Gately, 1994, 1995; Haas i Schipper, 1998; Berkhout *et al.*, 2000). L'explicació primària d'aquest fet és per la irreversibilitat de les inversions en tecnologies més eficients (Walker i Wirl, 1993). Quan els preus s'incrementen, els consumidors i els productors inverteixen en equipaments més eficients, i aquestes inversions tendeixen a mantenir-se quan els preus decreixen. Com a resultat, les estimacions basades en elasticitats preu variaran en funció de l'evolució dels preus del període analitzat (Haas i Schipper, 1998).

2.2. Revisió de literatura empírica

En aquest apartat es fa una revisió de la literatura existent sobre l'efecte rebot directe per a serveis energètics bàsicament domèstics, tot i que també es mostra evidència de l'efecte rebot directe fora de les llars, que és menys nombrosa.

En termes generals, la major part de literatura sobre estimacions economètriques de l'efecte rebot directe per a determinats serveis energètics, ja sigui per la importància que tenen, com per la disponibilitat de dades, és dels següents àmbits: enllumenat públic (Herring, 1999), transport privat, calefacció, refrigeració i en menor mesura altres usos domèstics com il·luminació, calefacció d'aigua, etc. (dins l'àmbit de les llars). També hi ha estudis empírics de l'efecte rebot directe en l'àmbit industrial o comercial (Nadel, 1993; Eto *et al.*, 1994, 1995), però són més limitats i queden fora de l'abast d'aquest treball. Grepperud i Rasmussen (2004) afirmen que l'extensió de l'efecte rebot directe a la indústria depèn de les possibilitats de substitució dels inputs: resulta major en indústries, com les siderúrgiques, amb possibilitats de substitució limitades, que en indústries com les dels productes químics i minerals amb majors oportunitats d'ajustar els inputs productius.

Per als usos domèstics, els principals esforços destinats a realitzar estimacions

economètriques de l'efecte rebot han estat en relació a les millores d'eficiència en els següents quatre àmbits:

1. Transport privat en vehicles
2. Calefacció domèstica
3. Refrigeració domèstica per a climatització
4. Il·luminació domèstica i no domèstica

També s'han fet alguns estudis, tot i que en menor nombre, per a altres usos finals domèstics. El fet que hi hagi menys evidència és degut, en gran part, a la dificultat en l'obtenció de dades sobre el seu consum energètic. Alguns d'aquests àmbits són la calefacció d'aigua, l'ús d'aparells electrònics i alguns electrodomèstics individuals com neveres, rentadores, etc.

De manera genèrica, les variables clau que afecten el consum d'energia per a usos domèstics inclouen, principalment (Greening *et al.*, 2000):

- Nivells de renda
- Altres classificacions de la despesa
- Factors demogràfics de les llars
- Cost del capital que utilitza l'energia
- Cost d'oportunitat del capital
- Altres costos
- Grandària i característiques constructives de les llars
- Eficiència en l'ús de l'energia

El principal problema per a portar a terme anàlisis empíriques en aquests àmbits és la falta de dades sobre les variables clau que afecten el consum d'energia per a aquests usos.

A continuació, la Taula 1 mostra un resum dels principals resultats trobats en els àmbits mencionats als EUA, realitzat en la revisió de la literatura empírica de l'efecte rebot feta per Greening *et al.* (2000).

Taula 1. Estimacions de l'efecte rebot directe per ús final del sector domèstic als EUA

Ús final	Efecte rebot	Número d'estudis revisats
Transport vehicles	10-30%	22*
Calefacció	10-30%	26**
Refrigeració	0-50%	9***
Calefacció d'aigua	<10-40%	5***
Il·luminació	5-12%	4***
Altres electrodomèstics	0%	2***

* Aquests estudis estan fets amb un nombre tal de diferents mètodes que proveeixen unes bones estimacions.

** Aquests estudis estan fets amb només un nombre moderat de diferents mètodes que mostren alguna variabilitat en les estimacions.

*** Aquests estudis estan fets amb només un o dos mètodes diferents i són inconclusius en els resultats.

Font: Greening *et al.* (2000).

Dins els estudis realitzats sobre l'efecte rebot directe a les llars s'observa que existeix una gran variabilitat en els resultats. Part d'aquesta variabilitat reflecteix la tecnologia utilitzada en la producció del servei, la consciència dels consumidors durant el consum del servei, els nivells de renda de l'àmbit d'estudi, etc. Hi ha però una altra part d'aquesta variabilitat que es deu als supòsits implícits que es realitzen en alguns estudis sobre el comportament dels consumidors, per exemple (Greening *et al.*, 2000):

- Consideració dels serveis energètics com a bé normal, ignorant els efectes d'haver saciat una necessitat.
- Limitacions temporals. L'augment de la demanda de determinats serveis energètics va acompanyada d'un augment en el temps necessari per a consumir-

los. Això fa que el consumidor hagi de sacrificar cada vegada una major proporció del seu temps en el consum del servei energètic, fet que reduiria l'efecte rebot (Dimitropoulos i Sorrell, 2006).

- c) Doble rol del consumidor com a productor i consumidor dels serveis energètics. El que significa que cada llar té un preu implícit diferent pel servei energètic (Cuijpers, 1995, 1996). Els preus implícits no només inclouen els preus de l'energia, també inclouen els costos de capital, és a dir, dels aparells que proporcionen els serveis energètics, i el treball de les llars. També inclou diferències en els estils de vida.
- d) Molt treballs no han considerat la importància de determinades característiques tècniques de la demanda dels serveis energètics. Per exemple, per a la calefacció o refrigeració són importants factors com la situació i característiques de la llar per a aprofitar energia solar.
- e) Sovint, per falta de dades, en funció de les variables *proxy* utilitzades per a la seva estimació, l'efecte rebot pot estar infraestimat o sobreestimat.
- f) Problemes d'especificació dels models construïts.

La no consideració de tots aquests factors en els treballs empírics provoca estimacions esbiaixades dels paràmetres. Especialment quan l'elasticitat preu de la demanda del servei energètic resulta elàstica (Einhorn, 1982; Schwartz i Taylor, 1995). Greening *et al.* (2000) indiquen que com a conseqüència de la falta de dades de consum final o de les variables clau explicatives associades a aquest consum final, moltes de les mesures de l'efecte rebot deuen estar sobreestimades.

A continuació es mostra un recull dels principals estudis empírics sobre l'efecte rebot directe en els diversos àmbits mencionats.

2.2.1. Transport privat en vehicles

La major part de l'evidència empírica sobre la magnitud de l'efecte rebot directe prové d'estudis sobre el transport als EUA, on hi ha bones dades estadístiques de quilòmetres recorreguts per vehicle i de consum de gasolina. A continuació, la Taula 2 mostra alguns estudis realitzats d'estimacions de l'efecte rebot directe en aquest àmbit.

Taula 2. Estudis empírics de l'efecte rebot directe per al transport privat

Autors	País objecte de les estimacions	Resultats de les estimacions de l'efecte rebot
Blair <i>et al.</i> (1984)	EUA (Florida)	21%
Leung i Vesenska (1987)	EUA (Hawaii)	25%
Mayo i Mathis (1988)	EUA	A curt termini del 22%, a llarg termini del 26%, però sense significació estadística
Weinblatt (1989)	EUA	Per sota del 10%
Gately (1990)	EUA	9%
Green (1992)	EUA	Entre el 5% i el 19%
Jones (1993)	EUA	A curt termini del 13%, a llarg termini al voltant del 30%
Walker i Wirl (1993)	Alemanya i Itàlia	Entre el 32% (Alemanya) i el 51% (Itàlia)
Haughton i Sarkar (1996)	EUA	A curt termini entre el 9% i el 16%, a llarg termini al voltant del 22%
Green <i>et al.</i> (1998)	EUA	A llarg termini al voltant del 20%
West (2004)	EUA	87%
Small i Van Dender (2005)	EUA	A curt termini del 4,5%, a llarg termini al voltant del 22%
Frondel <i>et al.</i> (2007)	Alemanya	A llarg termini entre el 56% i el 66%

Font: Elaboració pròpia a partir de Greening *et al.* (2000), Binswanger (2001) i Sorrell (2007).

Els resultats indiquen que el nombre de quilòmetres viatjats per vehicle incrementa (o rebota) entre el 9% i el 87%, com a resultat de la millora en l'eficiència de l'ús de gasolina en els vehicles, la gran variabilitat de resultats és bàsicament deguda a la varietat de mètodes i dades utilitzades en els diferents estudis. L'estimació de diferents períodes i àrees geogràfiques també conduiria a resultats diferents.

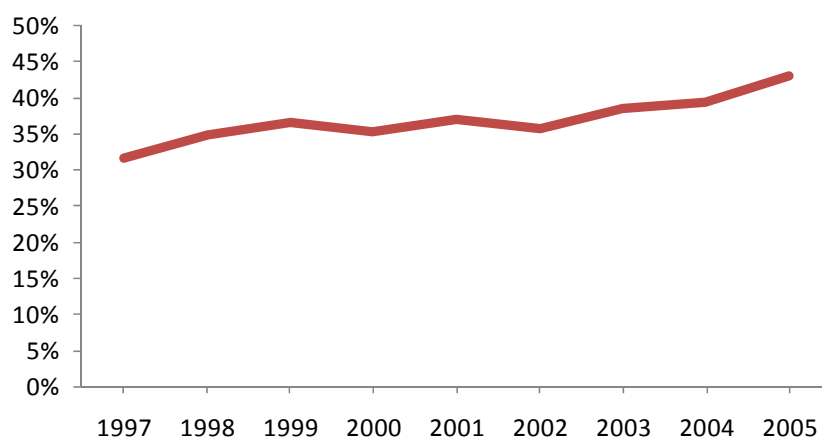
2.2.2. Calefacció domèstica

Aquest és un dels àmbits on s'han realitzat més estudis empírics de l'efecte rebot directe, juntament amb el del transport privat. Això és degut tant per la disponibilitat de dades com per la importància que té aquest servei energètic sobre el consum conjunt d'energia a les llars.

La calefacció és l'àmbit més demandant d'energia a les llars en la majoria dels països de l'OCDE. Segons el Departament de Comerç i Indústria del Regne Unit (*Department of Trade and Industry*, 2007), l'any 2005, la calefacció a les llars dels Regne Unit representava el 60% de l'ús energètic a les llars. Tot i així, en països més calorosos del sud d'Europa, aquest percentatge podria veure's reduït i prendre més importància la despesa energètica per refrigeració.

A Catalunya, i segons dades de l'Institut Català de l'Energia (ICAEN), la proporció del consum d'energia per a calefacció a les llars ha passat del 31,8% del consum total d'energia l'any 1997, a assolir el 43,1% l'any 2005.

Gràfic 2. Evolució del percentatge del consum d'energia per a calefacció domèstica sobre el consum total d'energia a les llars a Catalunya, 1997-2005.



Font: Elaboració pròpia a partir de dades de l'ICAEN.

La magnitud de l'efecte rebot estimada en els diferents estudis existents en aquest àmbit varia substancialment degut a l'àmbit, a la definició de la mesura de l'activitat i als mètodes utilitzats. Donat que la calefacció té característiques de bé públic local, el confort tèrmic és una bona mesura d'aquesta activitat. Els determinants del confort tèrmic inclouen (Greening *et al.*, 2000):

1. Actituds personals cap al confort tèrmic.
2. Nivells d'activitat dels individus.
3. Temperatura de l'aire.
4. Temperatura radiant mitjana (canvi de calor entre el cos humà i la temperatura del voltant).
5. Velocitat de l'aire o corrent.
6. Humitat.

Moltes d'aquestes variables no acostumen a ser recollides i, per tant, difícilment, el confort tèrmic pot ser avaluat (Isakson, 1983). El fet de no poder controlar tots els factors que afecten la demanda de calefacció fa que de les estimacions en resultin uns

paràmetres esbiaixats (Quigley i Rubinfeld, 1989). Segons Schwartz i Taylor (1995), estimacions economètriques que incloguin aquests factors produeixen estimacions més baixes de l'efecte rebot.

A continuació, la Taula 3 mostra alguns dels estudis que proveeixen evidència sobre l'existència de l'efecte rebot associada a la calefacció domèstica, així com els principals resultats obtinguts en les estimacions.

Taula 3. Estudis empírics sobre l'efecte rebot directe de la calefacció domèstica

Autors	País objecte de les estimacions	Resultats de les estimacions de l'efecte rebot
Khazzoom (1986)	EUA (Sacramento)	65%
Dubin <i>et al.</i> (1986)	EUA	Entre el 8% i el 13%.
Dinan (1987)	EUA	Efecte rebot petit però estadísticament significatiu
Hsueh i Gerner (1993)	EUA	35% per a electricitat i 58% per gas
Schwartz i Taylor (1995)	EUA	A llarg termini entre l'1,4% i el 3,4%
Hirst (1987)	EUA	Entre el 5% i el 25%
Nesbakken (2001)	Noruega	Entre el 15% i el 55% (mitjana del 21%)
Guertin <i>et al.</i> (2003)	Canada	A llarg termini del 29% al 47%

Font: Elaboració pròpia a partir de Greening *et al.* (2000), Binswanger (2001) i Sorrell (2007).

Greening *et al.* (2000), en l'exhaustiva revisió de la literatura que van realitzar, van arribar a la conclusió que per a una millora en l'eficiència energètica del combustible per a calefacció a les llars, l'efecte rebot causat dels efectes substitució i renda combinats estaven entre el 10% i el 30% dels estalvis potencials d'energia. El que suggereix que qualsevol millora tecnològica que millorés l'eficiència energètica en aquest àmbit tindria una efectivitat d'entre el 70% i el 90% de la reducció esperada en el consum energètic per a calefacció de manera directa. Les estimacions dels estudis de la Taula 3 situen l'efecte rebot per a calefacció a les llars entre l'1,4% de l'estudi de Schwartz i Taylor (1995) i el

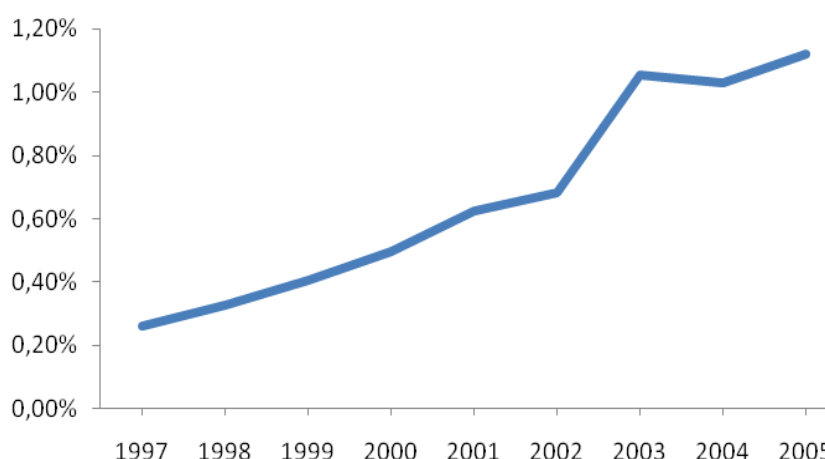
65% de l'estudi de Khazzoom (1986). De la mateixa manera que en el cas dels estudis per al transport privat, la gran variabilitat de resultats és deguda als diferents àmbits, la varietat de mètodes i les dades utilitzades en els diferents estudis. L'estimació en diferents períodes i contextos geogràfics també conduiria a resultats diferents.

2.2.3. Refrigeració domèstica per a climatització

La refrigeració domèstica per a climatització és un dels casos menys estudiats en la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe. El consum d'energia per a refrigeració és, en general, menor que el consum per a altres usos, però ha experimentat un creixement important durant la darrera dècada.

Segons dades de l'ICAEN, l'evolució a Catalunya de la proporció del consum d'energia per a refrigeració, en relació al consum total d'energia a les llars és la que mostra el Gràfic 3.

Gràfic 3. Evolució del percentatge del consum d'energia per a refrigeració domèstica sobre el consum total d'energia a les llars a Catalunya, 1997-2005



Font: Elaboració pròpia a partir de dades de l'ICAEN.

S'observa com el consum d'energia per a aquest ús ha passat de ser del 0,26% l'any 1997

a ser de l'1,5% l'any 2005, fet que implica un increment important, malgrat no suposar un percentatge elevat sobre consum total d'energia a les llars.

Pel que fa la refrigeració, cal considerar les mateixes qüestions que per a la calefacció sobre la identificació i mesura d'aquesta activitat. Els determinants del confort tèrmic també són els mateixos que els citats per a la calefacció (apartat 2.2.2), però en aquest cas cal fixar més l'atenció en els nivells d'humitat. Dubin *et al.* (1986) indiquen que els nivells d'efecte rebot potencial depenen molt de la capacitat d'utilització de l'aire condicionat, és a dir, la resposta als preus i l'efecte rebot serà menor en mesos on l'aparell està funcionant a plena capacitat.

Hausman (1979) i Dubin *et al.* (1986) van proveir les millors mesures de l'efecte rebot potencial en aquest àmbit, però tots dos estudis es van realitzar per a mostres petites i durant períodes de preus creixents de l'energia. Tots dos foren fets per als EUA. El primer va estimar un efecte rebot directe a curt termini del 4% i a llarg termini del 26,5%; mentre que Dubin *et al.* (1986) van estimar un efecte rebot directe entre l'1 i el 26%.

Segons Greening *et al.* (2000), d'aquests dos estudis es pot estimar un efecte rebot total entre 0% i el 50%, afirmant que aquesta variació tant àmplia es pot explicar pels factors que afecten a aquesta activitat, i com a causa primària, la capacitat d'utilització, és a dir si l'aparell està funcionant a plena capacitat, on hi haurà poc marge a efectes rebot, o bé si no està funcionant-hi, on hi haurà més marge.

2.2.4. Il·luminació domèstica i no domèstica

La il·luminació és un altre dels àmbits que ha tractat la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe, en aquest àmbit es troben estudis tant d'il·luminació domèstica com d'enllumenat públic.

En l'àmbit de la il·luminació domèstica cal destacar un estudi pel Regne Unit realitzat per Fouquet i Pearson (2006). En aquest mostraven l'evolució de la demanda d'energia per a il·luminació, així com el progrés de la tecnologia d'il·luminació, al llarg de set segles, des dels canelobres medievals, passant per les làmpades d'oli del segle XVIII, els llums de gas del segle XIX i finalment les làmpades elèctriques del segle XX. En l'estudi es mostra com, cada vegada que s'introduïa una nova tecnologia, es millorava l'eficiència energètica, i alhora, el consum s'incrementava de manera espectacular. Els llums elèctrics actuals són unes 700 vegades més eficients que les làmpades d'oli del segle XVIII, mentre que el consum anual (mesurat en lúmens-hora per càpita) és unes 6.500 vegades major. La Taula 4 mostra l'evolució de certes variables rellevants d'aquesta evolució durant els dos últims segles:

Taula 4. Canvis en el preu, l'eficiència i el consum de la il·luminació domèstica, 1800-2000.

Any	Preu del combustible per a il·luminació (nombres índex)	Eficàcia en la il·luminació	Preu de la llum per lumen (nombres índex)	Consum (lúmens-hora per càpita)	PIB real per càpita
1800	100	100	100	100	100
1850	40	400	26,8	400	100
1900	26	700	4,2	8.600	300
1950	40	44.100	0,15	154.400	400
2000	18	71.400	0,03	664.100	1.500

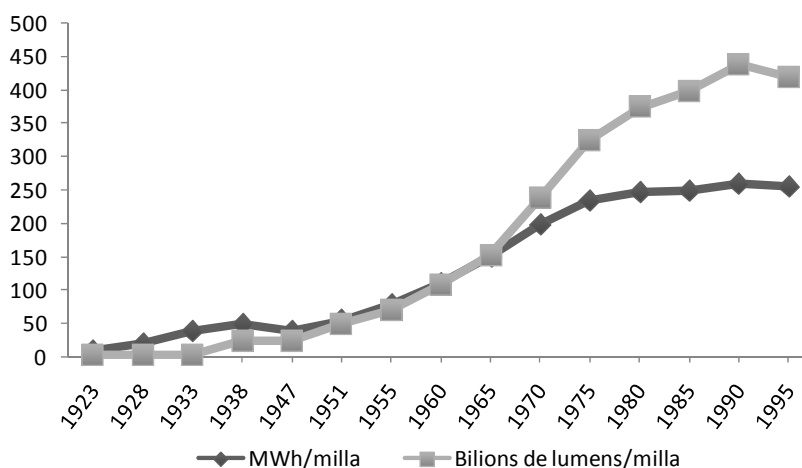
Índex 1800 = 100.

Font: Fouquet i Pearson (2006).

Pel que fa a l'enllumenat públic, Herring (1999) va realitzar un estudi empíric pel Regne Unit per al període 1920-1995. L'elecció d'aquest sector va ser deguda a l'existència de bones sèries estadístiques del consum d'electricitat, de l'eficiència de les làmpades i del quilometratge dels carrers. Aquestes estadístiques van mostrar un increment de 30 vegades el consum d'electricitat per a l'enllumenat públic, 20 vegades l'eficiència de les làmpades, però menys del 50% en el quilometratge dels carrers. Durant el mateix

període, la intensitat energètica, en termes de MWh per milla va incrementar 25 vegades, amb un augment del 250% des del 1960 (veure Gràfic 4).

Gràfic 4. Canvis en l'energia i en la intensitat de la llum per a l'enllumenat públic al Regne Unit, 1920-1995.



Font: Herring (1999).

La major part del gran increment en l'eficiència energètica de les làmpades ha adoptat la forma de majors nivells del servei, tant en un nombre major de quilòmetres il·luminats com en majors nivells d'il·luminació, i no en un menor consum. Durant el període de major creixement del consum, del 1960 al 1980, l'eficiència de les làmpades va créixer un 50%. Als anys 90 el consum i l'eficiència van estabilitzar-se.

Aquest procés de canvi tècnic va ser impulsat pels fabricants, que contínuament buscaven millores en l'eficiència per tal d'abaratir costos i crear nous mercats. Segons Herring (1999), l'expansió massiva del consum d'electricitat al segle XX va ser alimentada pel continu descens del preu de l'electricitat, acompanyat per un increment de l'eficiència d'aproximadament unes 10 vegades, que va impulsar el desenvolupament de nous béns i serveis elèctrics: il·luminació elèctrica el 1900, refrigeració domèstica el 1930, televisió el 1950, microones i vídeos el 1980, ordinadors i internet el 1990.

2.2.5. Altres usos domèstics

Hi ha diverses consideracions teòriques que suggereixen que els efectes rebot directes per a la majoria de la resta de serveis energètics a les llars són menors que els que es produirien per a la calefacció (Sorrell, 2007). Cal tenir en compte que a diferència del consum energètic per a calefacció:

- El cost de l'energia per a aquests serveis representa típicament una petita proporció dels costos totals de proveir-los.
- El cost total del servei energètic representa una petita proporció de la despesa total de les llars.
- Els consumidors són relativament insensibles al cost energètic d'aquests serveis.

En relació al tercer punt, les elasticitats preu de la demanda poden ser menors si el servei energètic en qüestió és d'alguna manera essencial per a la "vida diària", passant a considerar-se un bé de primera necessitat. Cuinar, escalfar aigua i rentar roba han entrat dins d'aquesta categoria en les societats més industrialitzades. Altres serveis energètics com els aparells electrònics, tot i no entrar dins d'aquesta categoria, podrien tenir unes elasticitats preu de la demanda cada vegada més baixes, a mesura que passen a formar part dels hàbits cada cop més arrelats als països més desenvolupats.

Segons el Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015 (Departament de Treball i Indústria, 2006), l'any 2003, la il·luminació de la llar representava el 7,5% del consum energètic total de les llars; el consum de les neveres, el 8,8%; la resta d'electrodomèstics el 6,2% i els aparells electrònics representaven un 5,3%.

Hi ha poca evidència sobre efecte rebot per a altres usos finals domèstics (Nadel, 1993). Aquests inclouen escalfar aigua, aparells electrònics, alguns electrodomèstics concrets com neveres, rentadores, etc. Tots aquests usos presenten molts problemes a l'hora

d'identificar-los i mesurar el seu consum energètic, ja que hi ha poques dades disponibles. Donada la falta de dades sobre aquestes activitats, la majoria d'aquests estudis es basen en l'anàlisi de la demanda condicional, els resultats dels quals no són consistents (Angel Economic Reports and Applied Econometrics, 1984).

Pel que fa l'efecte rebot per a escalfar aigua a les llars, Hartman (1984) va trobar que aquest es trobava entre el 10% i el 40%. Guertin *et al.* (2003) van trobar un efecte rebot a llarg termini d'entre el 34% i el 38% per a escalfar aigua i d'entre el 32% i el 49% per a un conjunt de serveis energètics que incloïen il·luminació i aparells electrònics.

Davis (2007) proveeix l'únic exemple d'estimació de l'efecte rebot per a rentar roba a les llars (que juntament amb l'assecar roba, afirma que representa una desena part del consum d'energia a les llars dels EUA. Davis va trobar un efecte rebot per a aquest servei energètic inferior al 5%.

Finalment, Greening *et al.*, (2000) consideren que per a tots els serveis energètics inclosos en aquesta categoria, els efectes renda podrien ser significants.

Capítol 3

ASPECTES TEÒRICS I METODOLÒGICS DE L'EFECTE REBOT DIRECTE

Com s'ha mostrat, l'estimació de l'efecte rebot directe presenta certes especificitats metodològiques. Aquest capítol analitza els principals aspectes teòrics, així com els desenvolupaments metodològics existents per a estimar l'efecte rebot directe a les llars a partir de dades secundàries i estimacions econòmriques. També introdueix alguns desenvolupaments metodològics nous.

En primer terme s'establirà la terminologia i les principals definicions. Posteriorment s'entrarà en aspectes més metodològics, centrats específicament en l'anàlisi de l'efecte rebot directe. Posteriorment s'analitzaran les diverses definicions existents a la literatura, fins a arribar a la que s'utilitzarà en aquest treball per a portar a terme les estimacions empíriques a les llars a Catalunya.

3.1. La demanda de serveis energètics

A continuació s'exposen els principals conceptes i definicions que cal tenir en compte per a l'anàlisi econòmica de l'efecte rebot directe. El contingut està extret de Becker (1965), Khazzoom (1980); Berkhout *et al.* (2000) i Dimitropoulos i Sorrell (2006).

En el context domèstic, la demanda d'energia (E) es deriva de la demanda de serveis energètics (SE); com són la demanda de refrigeració, de confort tèrmic o de força automotriu. Aquests serveis són proveïts a través d'una combinació d'energia, d'aparells que transformen l'energia, d'altres inputs i del propi treball dels membres de la llar. En aquest context, s'assumeix que els membres de la llar obtenen la seva utilitat del consum d'aquests serveis energètics, més que no pas del consum dels propis aparells.

Una característica essencial del servei energètic és el treball útil (S) obtingut, que pot ser mesurat de diverses maneres a través d'una gran varietat d'indicadors termodinàmics i

físics (Patterson, 1996). Aquests indicadors alhora poden ser descompostos de diverses maneres per tal de mostrar la importància relativa de les variables que hi contribueixen.

Un aspecte que també cal considerar en aquesta anàlisi és que els serveis energètics presenten atributs o característiques (A), que es combinen amb el treball útil i afecten el consum final d'energia. La combinació del treball útil i els atributs proporciona un servei energètic en particular (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$SE_i = f(S_i, A_i) \quad (1)$$

La funció de producció domèstica de Becker proporciona un marc útil per a entendre la demanda de serveis energètics (Becker, 1965). Aquest model assumeix que les llars produeixen serveis energètics per al seu propi consum, i que el treball útil d'un servei energètic s'obté a través d'una combinació de matèries primeres energètiques (E), capital (K), altres béns de mercat (O) i part del treball propi dels membres de la llar, mesurat en quantitat de temps (T). En una anàlisi de la refrigeració, hi hauria, per exemple, l'electricitat (E), els aparells d'aire condicionat (K), les despeses de manteniment i operatives (O) i el temps per a la posada en marxa i funcionament i altres qüestions relacionades amb el treball dedicat a l'obtenció de refrigeració (T).

La provisió de treball útil per a un servei energètic particular pot ser descrita per una funció de producció, representant l'output màxim que pot ser assolit a través de la tecnologia disponible, per a un nivell donat d'energia i altres inputs (Wirl, 1997). Donat que, com mostra l'equació (1), els atributs també afecten la provisió d'un servei energètic (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$SE_i = f(E_i, K_i, O_i, T_i, A_i) \quad (2)$$

La utilitat de les llars que depèn dels serveis energètics (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$U_{SE} = f(SE_1, SE_2, SE_3, \dots, SE_n) \quad (3)$$

Una hipòtesi addicional és que les llars estan subjectes a restriccions pressupostàries i temporals. Pel que fa la primera tenim que (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$V + T_w P_w \geq \sum_{i=1, n} (P_E E_i + P_O O_i + \delta_K K_i) \quad (4)$$

Sent V la renda no salarial, T_w el temps gastat en el mercat laboral, P_w el rati salarial mitjà; P_E i P_O representen el preu unitari de l'energia i dels altres béns, respectivament; δ_K és un factor de descompte. L'expressió $P_K = \delta_K K(A)$ proporciona els costos de capital anualitzats.

La restricció temporal de les llars ve donada per (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$T = T_w + \sum_{t=1}^n T_i \quad (5)$$

On T_i representa el temps dedicat a produir el treball útil S_i . Assumint que el diner i el temps són, en part, intercanviables a través de decisions sobre T_w (Becker, 1965), les restriccions de renda (4) i de temps (5) poden fusionar-se en una única restricció que englobi les dues (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$V + P_w T \geq \sum_{t=1}^n (P_E E_i + P_O O_i + \delta_K K_i + P_w T_i) \quad (6)$$

En el context de l'anàlisi de l'efecte rebot directe a les llars, el marc que proporciona la

funció de producció de Becker permet, segons (Dimitropoulos i Sorrell, 2006); en primer lloc, derivar la utilitat de les llars a partir del consum dels serveis energètics i no de les matèries primeres energètiques; segon, reconeix el doble paper productor i consumidor de les llars d'aquests serveis; i tercer, el temps és un input important a considerar en la producció d'aquests serveis.

Com indiquen Sorrell i Dimitropoulos (2007), les crítiques al model de Becker han vingut bàsicament pels supòsits considerats. Algunes d'aquestes es poden veure a Pollack i Wachter (1975) i Juster i Stafford (1991). Ofereix però, un gran nombre d'avantatges enfront a altres models convencionals de demanda d'energia, i les prediccions del model estan àmpliament confirmades per la recerca empírica (Juster i Stafford, 1991).

Una important contribució del model de Becker a la recerca empírica que es porta a terme en aquest treball és tenir present que el consum d'un servei energètic implica tres *trade-offs* (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

1. Entre el consum de treball útil i el consum d'altres atributs d'un servei energètic.
2. Entre energia, capital, altres béns de mercat i temps, en la producció d'un servei energètic.
3. Entre el consum de diferents serveis energètics.

3.2. L'efecte rebot directe com una elasticitat eficiència de l'energia

De la mateixa manera que l'apartat 3.1, els raonaments seguits en aquest apartat estan extrets de Khazzoom (1980), Henly *et al.* (1988), Berkhout *et al.* (2000), Dimitropoulos i Sorrell (2006) i Sorrell (2007).

A continuació es resumeixen les principals maneres de mesurar l'efecte rebot directe existents a la literatura basada en estimacions economètriques. Alguns autors estableixen

l'elasticitat eficiència de la demanda d'energia com una mesura directa de l'efecte rebot (Khazzoom, 1980; Berkhout *et al.*, 2000; Dimitropoulos i Sorrell, 2006), tot i que, com es mostra a continuació, també hi ha altres variables que sota certes hipòtesis es poden considerar una mesura de l'efecte rebot.

El concepte originari d'efecte rebot de Khazzoom (1980) va ser deduït pel cas d'un servei energètic individual. Va prendre com a punt de partida la demanda d'energia per a un servei energètic particular com a funció del preu del treball útil d'aquest servei (P_S).

L'eficiència ($\mathcal{E}$) d'un sistema energètic es pot definir com (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\mathcal{E} = S / E \quad (7)$$

És a dir, el treball útil aconseguit per unitat d'energia consumida. El preu del treball útil (P_S) és el preu de l'energia (P_E) entre l'eficiència (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$P_S = P_E / \mathcal{E} \quad (8)$$

De manera genèrica, s'entén com cost generalitzat del treball útil (P_G), a la suma dels costos dels diversos factors del treball útil (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$P_G = (P_E / \mathcal{E}) + P_K + P_M + P_T \quad (9)$$

On P_K són els costos de capital anualitzats, P_M són els costos de manteniment i operatius, i P_T són els costos de temps.

A partir de l'equació (9), el que succeeix en realitat, és que la millora d'eficiència energètica redueix el cost energètic unitari del treball útil ($\Delta P_S < 0$) i, per tant, el cost

total. Si s'assumeix que el servei energètic té les característiques d'un bé no "giffen",⁴ els consumidors demandaran més treball útil ($\Delta S > 0$), i aleshores, la variació proporcional en el consum d'energia serà menor que la variació en l'eficiència energètica ($\Delta E / E < -\Delta \varepsilon / \varepsilon$).

La variació en la demanda de treball útil deguda a una variació en l'eficiència energètica pot ser mesurada a través de l'elasticitat eficiència energètica de la demanda de treball útil ($\eta_\varepsilon(S)$) (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_\varepsilon(S) = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} \quad (10)$$

De la mateixa manera, la variació de la demanda d'energia deguda a una variació en l'eficiència energètica es pot mesurar amb l'elasticitat eficiència energètica de la demanda d'energia ($\eta_\varepsilon(E)$) (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} \quad (11)$$

Substituint $E = S / \varepsilon$, de (7) a (11) i amb derivades parcials (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

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

I d'aquesta expressió es pot derivar la següent relació entre les elasticitats de l'equació

⁴ Seria doncs, un bé "normal" o "inferior", el primer és aquell que davant d'un increment de la renda real del consumidor, veuria incrementada la seva demanda, mentre que un bé "inferior" seria aquell que, en aquest cas, la seva demanda es veuria reduïda.

(10) i l'equació (11) (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1 \quad (12)$$

L'expressió que mostra l'equació (12) és la definició més comuna de la mesura de l'efecte rebot directe per un servei energètic particular (Berkhout *et al.*, 2000).

D'aquesta manera s'arriba a una conclusió important: l'estalvi energètic degut a una millora de l'eficiència energètica es correspondrà amb el que prediuen els models matemàtics només quan l'elasticitat eficiència de la demanda de treball útil per a un servei energètic sigui igual a zero ($\eta_{\varepsilon}(S) = 0$), aleshores l'elasticitat eficiència de la demanda d'energia ha de ser igual a -1 ($\eta_{\varepsilon}(E) = -1$). Un efecte rebot positiu implica que $\eta_{\varepsilon}(S) > 0$, i per tant $|\eta_{\varepsilon}(E)| < 1$.

Des d'aquesta perspectiva, si es donés el cas que $\eta_{\varepsilon}(S) > 1$, és a dir, que la demanda fos elàstica, o bé, que $\eta_{\varepsilon}(E) > 0$, estaríem parlant d'un cas especial d'efecte rebot en el qual una millora de l'eficiència energètica acaba produint un increment del consum energètic. Aquest cas s'anomena *backfire* en la literatura (Saunders, 1992).

Una millora tecnològica que produeix una millora en l'eficiència energètica pot conduir però a diverses manifestacions de l'efecte rebot directe:

- Un increment en el nombre d'aparells convertidors d'energia (NO). Un impacte important de la major eficiència i els conseqüents menors costos dels serveis energètics és en els nous consumidors, és a dir, sobre aquells que anteriorment no podien permetre's el servei.
- Un increment en la capacitat mitjana dels nous aparells convertidors d'energia

(CAP).

- Un increment de la seva utilització mitjana (UTIL), o bé un decreixement del seu factor de càrrega mitjana (F), com per exemple podria succeir en el cas dels vehicles, on es realitzarien més trajectes amb un únic ocupant al vehicle.

Aleshores, es pot expressar la demanda de treball útil com (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$S = NO * CAP * UTIL \quad (13)$$

D'aquesta manera, l'equació referent a l'elasticitat eficiència energètica de la demanda d'energia es pot descompondre en diversos factors. A partir de les equacions (10), (11), (13) i de $S = \varepsilon E$ derivat de l'equació (7) (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \frac{\varepsilon}{E} \left[-\frac{(NO * CAP * UTIL)}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \left((NO * CAP) \frac{\partial UTIL}{\partial \varepsilon} + (CAP * UTIL) \frac{\partial NO}{\partial \varepsilon} \right) \right]$$

substituint $E = (NO * CAP * UTIL) / \varepsilon$ i cancel·lant termes (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -1 + \left(\frac{\varepsilon}{UTIL} \frac{\partial UTIL}{\partial \varepsilon} + \frac{\varepsilon}{CAP} \frac{\partial CAP}{\partial \varepsilon} + \frac{\varepsilon}{NO} \frac{\partial NO}{\partial \varepsilon} \right)$$

El que finalment porta a l'expressió (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = [\eta_{\varepsilon}(NO) + \eta_{\varepsilon}(CAP) + \eta_{\varepsilon}(UTIL)] - 1 \quad (14)$$

L'equació (14) no és més que la desagregació de l'equació (12) en diversos factors. És el mateix fer una estimació de l'elasticitat eficiència de la demanda de treball útil d'un

servei energètic que fer-la de l'elasticitat eficiència de la demanda d'aparells convertidors d'energia, de la capacitat d'aquests aparells i de la seva utilització mitjana, i posteriorment realitzar una agregació d'aquestes tres elasticitats. La importància relativa de cadascuna d'aquestes variables pot canviar entre serveis energètics, entre regions i països i al llarg del temps.

3.3. L'efecte rebot directe com una elasticitat preu

Com indica Sorrell (2007), un dels principals problemes a l'hora de portar a terme recerca empírica sobre l'efecte rebot és la dificultat de treballar amb dades d'eficiència energètica de serveis energètics concrets. Per una banda, hi ha un gran nombre de definicions d'eficiència energètica i dificultats en la disponibilitat de dades; per altra, hi ha el problema que per a molts serveis energètics, les dades disponibles només proveeixen una variabilitat limitada de la variable independent de la primera definició de l'efecte rebot (en aquest cas, el paràmetre ε de equació (12)), el que comporta una varianza molt gran de les elasticitats estimades, que al mateix temps requereix controlar els preus energètics.

Sota el supòsit que els consumidors responen de la mateixa manera a increments (decrements) de l'eficiència energètica que a decrements (increments) dels preus energètics, es poden considerar altres variables independents, utilitzades en altres definicions, com són els preus dels serveis energètics (P_S) o els preus de l'energia (P_E), i que reflecteixen alhora variacions en l'eficiència energètica i en els preus, i permeten estimacions de l'efecte rebot directe, encara que les dades disponibles d'eficiència energètica proveixin una variació petita o inexistent (Sorrell, 2007).

Com es mostra a continuació a l'apartat 3.3.1, hi ha altres vies per a realitzar estimacions empíriques de l'efecte rebot. En aquest es demostra com, sota determinades hipòtesis, es poden obtenir mesures de l'efecte rebot, a partir d'estimacions d'elasticitats preu de la

demanda. Aquest apartat segueix els raonaments realitzats a Khazzoom (1980), Henly *et al.* (1988), Berkhout *et al.*, (2000), Dimitropoulos i Sorrell (2006) i a Sorrell (2007), entre d'altres.

3.3.1. Definicions de l'efecte rebot directe a partir de les elasticitat preu

Seguint els raonaments de l'apartat 3.2, donat que $P_s = P_E / \varepsilon$, un increment (decrement) de l'eficiència energètica (ε), quan els preus energètics (P_E) es mantenen constants, té els mateixos efectes sobre el preu del treball útil (P_s) que un decrement (increment) de la mateixa magnitud en els preus energètics, quan l'eficiència energètica es manté constant.

Així que, sota aquest supòsit, l'efecte sobre el cost total i per tant sobre la demanda de servei energètic (S) hauria de ser simètric. Suposant que els nivells de renda i els preus dels altres béns es mantenen constants, es pot escriure la demanda de treball útil només com a funció del seu preu ($S = f(P_s)$) i, per tant dels preus energètics i de l'eficiència energètica: $S = f(P_E / \varepsilon)$.

Aleshores, la demanda d'energia, que de l'equació (7) es pot establir com $E = S(P_s) / \varepsilon$, ara vindrà donada per: $E = f(P_E / \varepsilon) / \varepsilon$. Assumint que els preus de l'energia són exògens, és a dir, que no depenen de l'eficiència energètica (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

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

el que és equivalent a (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_S}(S) - 1 \quad (15)$$

Una versió de la definició que apareix a l'equació (15) és la que ha estat utilitzada per Khazzoom (1980), Berkhout *et al.* (2000), Binswanger (2001) i Greene *et al.* (1999a) per a estimar l'efecte rebot directe, ja que resulta més senzilla d'aplicar que l'equació (12), sobretot pel que fa la disponibilitat de dades d'eficiència.

Sota aquests supòsits, l'elasticitat eficiència energètica de la demanda d'energia ($\eta_{\varepsilon}(E)$) és igual a l'elasticitat preu de la demanda de treball útil ($\eta_{P_S}(S)$), menys u. En aquesta nova definició, l'elasticitat preu de la demanda de treball útil ($\eta_{P_S}(S)$) s'utilitza com a *proxy* de l'elasticitat eficiència energètica de la demanda d'energia ($\eta_{\varepsilon}(E)$), que es correspon a la definició primària de l'efecte rebot directe.

De manera anàloga a l'equació (14), l'equació (15) es pot descompondre com es mostra a continuació (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\left[\eta_{P_S}(NO) + \eta_{P_S}(CAP) + \eta_{P_S}(UTIL)\right] - 1 \quad (16)$$

Donat que no sempre hi ha dades disponibles sobre eficiència energètica (ε), dada requerida per estimar el preu del servei energètic, es pot utilitzar una definició alternativa de l'efecte rebot (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(S) - 1 \quad (17)$$

Aquesta nova definició se sustenta sobre dues hipòtesis que cal tenir en compte:

1. Simetria: els consumidors responen de la mateixa manera a increments (decrements) en l'eficiència energètica que a decrements (increments) dels preus

energètics.

2. Exogeneïtat: l'eficiència energètica no es veu afectada per canvis en els preus energètics ($\eta_{p_E}(\varepsilon) = 0$).

Pel que fa la primera hipòtesi, sota determinades condicions és realista pensar que els consumidors responen de la mateixa manera a un decrement dels preus energètics que a una millora de l'eficiència, i a la inversa, donades les millores, assumibles com a menors costos, que comporta una millora de l'eficiència. És un supòsit realista, donat que una millora de l'eficiència energètica implica, per definició, una menor quantitat d'energia per a produir la mateixa quantitat de treball útil, el que representaria una menor despesa (equivalent a un abaratiment) per la mateixa quantitat de treball útil.

La hipòtesi de que l'eficiència energètica no és afectada pels preus de l'energia també resulta raonable en períodes d'estabilitat o decreixement dels preus de l'energia, però deixa de ser certa en períodes d'increments dels preus de l'energia, on s'ha demostrat que aquests increments indueixen a millores tecnològiques no reversibles quan els preus cauen (Dargay, 1992; Grubb, 1995; Dimitropoulos i Sorrell, 2007). Si canvis en els preus energètics indueixen canvis en l'eficiència energètica, la utilització d'aquesta definició pot portar a estimacions esbiaixades, ja que la variació en el preu energètic del treball útil no serà directament proporcional a la variació en els preus energètics.

El no compliment d'aquestes hipòtesis portaria a sobreestimar la dimensió de l'efecte rebot, pel que és convenient realitzar estimacions de l'efecte rebot directe a partir d'aquesta definició en períodes on els preus de l'energia cauen o es mantenen estables.

Tal i com mostren Greening i Green (1998) també cal tenir en compte, en aquest context, que molts resultats d'estimacions empíriques suggereixen que la demanda de la majoria de serveis energètics acostumen a resultar inelàstiques:

$$-1 < \eta_{P_E}(S) < 0$$

Per motius de disponibilitat de dades, la definició que mostra l'equació (17) és sovint més utilitzada per a obtenir estimacions de l'efecte rebot directe que la definició que mostra l'equació (12), ja que en aquest cas no es requereixen dades sobre eficiència energètica.

Però les dades sobre treball útil d'un determinat servei energètic també són sovint difícils d'obtenir. És més comú disposar de dades sobre la demanda d'energia del servei energètic.

Donat $P_S = P_E / \varepsilon$ i $E = S(P_S) / \varepsilon$ (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{\partial S}{\partial P_S} \frac{P_S}{S} = - \frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial\left(\frac{P_E}{\varepsilon}\right)} \frac{P_E/\varepsilon}{\varepsilon E}$$

Assumint que l'eficiència energètica es manté constant (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{\partial E}{\partial P_E} \frac{P_E}{E} = \eta_{P_E}(E)$$

El que condueix a una definició alternativa de l'efecte rebot basada en la pròpia elasticitat preu de la demanda d'energia ($\eta_{P_E}(E)$) (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(E) - 1 \quad (18)$$

D'aquesta manera, sota certs supòsits, l'efecte rebot pot presentar-se aproximadament com la pròpia elasticitat preu de la demanda d'energia per al servei energètic rellevant.

De la mateixa manera que l'equació (17) (tercera definició d'efecte rebot), aquesta es basa en les següents hipòtesis:

1. Simetria: els consumidors responen de la mateixa manera a increments (decrements) en l'eficiència energètica que a decrements (increments) dels preus energètics.
2. Exogeneïtat: l'eficiència energètica no es veu afectada per canvis en els preus energètics ($\eta_{p_e}(\varepsilon) = 0$).

Aquesta nova definició permet estimacions de l'efecte rebot directe de molts serveis energètics de les llars quan no es disposa de dades sobre l'eficiència energètica o el treball útil dels mateixos. Com indiquen Dimitropoulos i Sorrell (2007), el fet de poder realitzar estimacions de l'efecte rebot només a partir de dades de consum energètic a les llars i dels preus de l'energia, obre un ampli ventall de possibilitats, així com la consideració d'un conjunt d'estudis que han realitzat estimacions d'elasticitats preu del consum d'energia, sense considerar explícitament l'efecte rebot.

En el cas que les dades sobre consum d'energia disponibles corresponguin a un conjunt de serveis energètics, com per exemple dades sobre el consum d'electricitat a les llars, hi ha tècniques com l'anàlisi de demanda condicional que permeten assignar la proporció del consum d'energia a cada servei energètic particular (Parti i Parti, 1980).

3.3.2. Característiques de l'elasticitat preu de la demanda d'energia

Espey (1998) va realitzar una metanàlisi a nivell internacional d'estudis d'elasticitats preu de la demanda de gasolina. Dahl (1993), de manera similar, va realitzar una revisió de la literatura existent sobre estudis empírics d'elasticitats preu de la demanda d'energia. De tots dos estudis es pot concloure que l'elasticitat preu de la demanda d'energia és

relativament inelàstica, amb un rang que va des de -0,3 fins a -0,9, en el llarg termini.

Aquests valors estimats suggeririen, a partir de la quarta definició de l'efecte rebot directe (veure equació (18)), un efecte rebot directe d'entre el 30% i el 90%, per tant, sense arribar al llindar del 100% que marcaria el punt a partir del qual es produiria *backfire*.

Cal tenir en compte que l'elasticitat preu de la demanda, i específicament de la demanda d'energia, no és un concepte universal i invariable, sinó que contràriament varia entre (Douthitt, 1989; Berkhout *et al.*, 2000):

1. Matèries primeres energètiques.
2. Serveis energètics.
3. Usos finals.
4. Països, regions i altres realitats geogràfiques.
5. Sectors i agents econòmics.
6. Nivells de renda.
7. Adquireix diferents valors en funció s'estigui en un període de creixement dels preus energètics o de decreixement d'aquests.

Donat que les elasticitats preu de la demanda no són més que la reacció dels consumidors enfront a una variació del preu, cadascuna de les característiques descrites provoquen diferents reaccions, ja sigui en funció del producte i els seus substitutius, les necessitats subjectives dels consumidors, o altres.

Pel que fa a l'últim punt, alguns autors (Kouris, 1982; Gately, 1992, 1993; Dargay, 1992; Dargay i Gately, 1994, 1995; Haas i Schipper, 1998; Berkhout *et al.*, 2000) mostren com una altra característica de les elasticitats preu de la demanda d'energia és que tenen tendència a ser majors en períodes de preus energètics creixents que en períodes on els preus energètics decreixen. Per això, l'estimació d'elasticitats basades en sèries temporals

varien en funció de si durant el període, els preus de l'energia pugen o baixen (Haas i Schipper, 1998).

Per a aquesta raó, com indica Sorrell (2007), el més adequat per a estimar l'efecte rebot directe a partir de l'estimació d'elasticitats preu de la demanda d'energia és fer-ho per a períodes d'estabilitat o decreixement dels preus energètics, ja que les estimacions basades en períodes de preus creixents sobreestimen el tamany de l'efecte. Una explicació d'aquest fet és que, uns preus energètics majors indueixen millores tecnològiques de l'eficiència energètica no reversibles quan els preus de l'energia cauen (Grubb, 1995; Walker i Wirl, 1993). D'altra banda, com indica Grubb (1995), els requeriments d'eficiència energètica venen també expressats en regulacions que busquen que les noves inversions mantinguin uns estàndards d'eficiència elevats encara que no hi hagi l'incentiu dels preus.

De totes maneres, com es mostrarà a continuació, la utilització de l'elasticitat preu de la demanda d'energia sense consideracions addicionals, pot produir una sobreestimació de l'efecte rebot.

3.3.3. Principals problemes de les estimacions amb elasticitats preu de la demanda

Com apunta Sorrell (2007), la utilització de les elasticitats preu de la demanda com a *proxy* de l'efecte rebot té uns supòsits implícits que cal tenir en compte (especialment pel que fa al supòsit de la simetria). Pel que fa a l'objectiu d'aquest treball, es prestarà especial importància als següents problemes:

1. La correlació entre l'eficiència energètica i els costos de capital.
2. L'endogeneïtat de l'eficiència energètica.

3.3.3.1. Correlació entre eficiència energètica i costos de capital

Per a determinats serveis energètics, els aparells convertidors d'energia més eficients tenen uns costos de capital més elevats que els aparells més ineficients, pel que K i ε estarien positivament correlacionats, per a d'altres serveis succeeix el contrari, és a dir hi ha una correlació negativa.

Com indiquen Dimitropoulos i Sorrell (2006), les estimacions de l'efecte rebot a partir de les elasticitats preu de la demanda d'energia realitzades per Khazzoom (1980) han estat rebatudes per diversos autors (Besen i Johnson, 1982; Einhorn, 1982; Henly *et al.*, 1988; Lovins *et al.*, 1988; Brannlund *et al.*, 2005) degut a l'omissió que va fer dels costos de capital. Això podria conduir a sobreestimacions de l'efecte rebot.

Seguint el desenvolupament realitzat per Henly *et al.* (1988), si s'assumeix que els costos de capital són una funció de l'eficiència energètica i que el consum d'energia depèn d'aquests costos, l'equació (7) es transforma en: $E = f[P_E/\varepsilon, P_K(\varepsilon)]/\varepsilon$. Aleshores agafant derivades parcials respecte l'eficiència energètica (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\frac{\partial E}{\partial \varepsilon} = -\frac{S}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} = -\frac{S}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial S}{\partial P_S} \frac{\partial P_S}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} \right] = -\frac{S}{\varepsilon^2} - \frac{P_E}{\varepsilon^3} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon}$$

Multiplicant per ε/E (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} &= -\frac{S}{\varepsilon E} - \frac{P_E}{\varepsilon^2 E} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{1}{E} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} = -1 - \frac{P_E/\varepsilon}{\varepsilon E} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{1}{E} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} &= -1 - \frac{P_S}{S} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{\varepsilon}{S} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} \end{aligned}$$

El que condueix a la següent definició alternativa de l'elasticitat eficiència energètica de la demanda d'energia (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\left[\eta_{P_S}(S) - \left(\eta_{P_K}(S) \eta_{\varepsilon}(P_K)\right)\right] - 1 \quad (19)$$

L'equació (19) mostra com, en el cas que existeixi una correlació positiva entre eficiència energètica i costos de capital, l'efecte rebot resultarà menor que les estimacions realitzades a partir de la definició de l'equació (15). En cas contrari, resultarà major. La variable a considerar en els costos de capital tindria més a veure amb els costos anualitzats dels aparells que amb els costos inicials, és a dir, els costos descomptats per la seva vida útil, els quals dependrien de les preferències temporals dels consumidors i de la vida útil dels aparells.

En general (Sorrell i Dimitropoulos, 2007), la magnitud i direcció de l'efecte rebot, estimat a partir de les definicions que mostren les equacions (15), (17) i (18) dependrà del grau i signe de la correlació entre l'eficiència energètica i la resta de categories de costos implicats per a proveir el servei energètic, incloent-hi els costos de capital, els operatius i els de manteniment. Si estan positivament correlacionats, el biaix serà negatiu i l'efecte rebot directe estarà sobreestimat, mentre que si estan negativament correlacionats el biaix serà positiu i l'efecte rebot estarà infraestimat.

3.3.3.2. *Endogeneïtat de l'eficiència energètica*

Fins el moment s'ha considerat l'eficiència energètica com una variable exògena, és a dir, que és independent de la resta de variables independents, però en realitat l'eficiència energètica hauria de ser considerada, en part, endògena.

Com indiquen Dimitropoulos i Sorrell (2007), Green *et al.* (1999) i Small i Van Dender

(2005), mostren com l'eficiència energètica és funció dels preus actuals i passats ($\varepsilon = f(P_{E,t-1})$). Això és degut a que, a curt termini, l'increment dels preus de les matèries primeres energètiques fa que els consumidors utilitzin els aparells de que disposen de manera més eficient per a mantenir el cost. A llarg termini, l'increment de preus incentiva als consumidors a comprar aparells més eficients i als productors a fer una major despesa en R+D per tal de respondre a les expectatives dels consumidors i ser competitius.

Considerant l'endogeneïtat de l'eficiència energètica, l'equació (7) quedaria com: $E = f[P_E / \varepsilon(P_E)] / \varepsilon(P_E)$. Diferenciant aquesta equació pels preus energètics i substituint l'expressió $\eta_{P_E}(S)$ a la definició de l'equació (15), s'obté una definició alternativa de l'efecte rebot que té en compte les millores de l'eficiència energètica induïdes pels preus:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = - \left[\frac{\eta_{P_E}(E) + \eta_{P_E}(\varepsilon)}{1 - \eta_{P_E}(\varepsilon)} \right] - 1 \quad (20)$$

Diferents versions de l'equació (20) es troben a Blair *et al.* (1984), Mayo i Mathis (1988), Greene *et al.* (1999b) i a Small i Van Dender (2005).

3.3.4. La millor aproximació per a determinar la magnitud de l'efecte rebot directe d'un servei energètic

Com demostren Hanly *et al.* (2002) en un estudi sobre elasticitats preu de la demanda del transport, la magnitud relativa de cadascuna de les diferents elasticitats mostrades en l'apartat 3.3, per a un servei energètic particular, és la que es mostra a continuació.

Començant per la següent derivació de l'equació (7): $E = S[P_E / \varepsilon(P_E)] / \varepsilon(P_E)$, l'elasticitat preu de la demanda de treball útil es pot expressar com (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{P_S}{S} \frac{\partial S}{\partial P_S} = \frac{P_S}{S} \left[\varepsilon \frac{\partial S}{\partial P_S} + E \frac{\partial \varepsilon}{\partial P_S} \right] = \frac{P_S}{E} \frac{\partial E}{\partial P_S} + \frac{P_S}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial P_S}$$

o bé (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{P_S}(E) = \eta_{P_S}(S) - \eta_{P_S}(\varepsilon) \quad (21)$$

Suposant que es compleix la hipòtesi de que $\eta_{P_S}(\varepsilon) \geq 0$, és a dir que un major cost del treball útil incentivi una major eficiència energètica, i que $\eta_{P_S}(S) \leq 0$, és a dir, que uns preus majors redueixin la demanda de treball útil (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$|\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_S}(E)| \quad (22)$$

De manera anàloga es pot obtenir que $\eta_{P_E}(E) = \eta_{P_E}(S) - \eta_{P_E}(\varepsilon)$, i per tant (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$|\eta_{P_E}(S)| \leq |\eta_{P_E}(E)| \quad (23)$$

A partir de l'equació (20), corresponent a la definició de l'efecte rebot que considera endogeneïtat de l'eficiència energètica, s'obté (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$\eta_{P_E}(E) = \eta_{P_S}(S) [1 - \eta_{P_E}(\varepsilon)] - \eta_{P_E}(\varepsilon) \quad (24)$$

Suposarem que el valor de l'elasticitat preu de l'energia respecte l'eficiència energètica està entre 0 i 1: $0 \leq \eta_{P_E}(\varepsilon) \leq 1$, i que l'elasticitat preu del treball útil respecte la demanda de treball útil està entre -1 i 0: $-1 \leq \eta_{P_S}(S) \leq 0$. Aleshores (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$|\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_E}(E)| \quad (25)$$

Combinant les expressions (22), (23) i (25), s'obté (Dimitropoulos i Sorrell, 2006):

$$|\eta_{P_E}(S)| \leq |\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_E}(E)| \leq |\eta_{P_S}(E)| \quad (26)$$

Com indiquen Hanly *et al.* (2002), aquesta relació és un important punt de referència per a l'evidència empírica existent sobre les estimacions econòmiques sobre l'efecte rebot. Aquesta relació també mostra com la gran literatura existent sobre estimacions d'elasticitats del preu de la demanda d'energia ($\eta_{P_E}(E)$) pot ser interpretada com a límit superior de la magnitud de l'efecte rebot directe.

A continuació, la Taula 5 exposa, a mode de resum, les diverses definicions de l'efecte rebot directe que han anat apareixent, a partir de l'estimació d'elasticitats.

Taula 5. Resum de definicions de l'efecte rebot directe a partir de l'estimació d'elasticitats

Definició d'efecte rebot	Formalització matemàtica
1. Definició matemàtica –de l'enginyeria–	$\eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1$
2. Definició “econòmica”	$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_S}(S) - 1$
3. Primera aproximació –a través del preu de l'energia–	$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(S) - 1$
4. Segona aproximació –a través del preu de l'energia i la demanda d'energia–	$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(E) - 1$

Nota: el símbol η representa l'elasticitat, ε és l'eficiència energètica, E és la demanda d'energia, S és la demanda de treball útil, P_S és el preu del treball útil, P_E és el preu de l'energia.

Font: adaptació de Dimitropoulos i Sorrell (2006).

A mode de resum, si les millores d'eficiència energètica estan associades amb variacions

en els costos de capital (equació (19)) i si l'eficiència energètica està influenciada pels preus energètics (és a dir, existeix endogeneïtat, equació (20)), l'expressió més apropiada per a estimar la magnitud de l'efecte rebot, a partir d'una adaptació de la que mostra (Dimitropoulos i Sorrell, 2006), seria:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = - \left[\left(\frac{\eta_{P_E}(E) + \eta_{P_E}(\varepsilon)}{1 - \eta_{P_E}(\varepsilon)} \right) - \left(\eta_{P_K}(S) \eta_{\varepsilon}(P_K) \right) \right] - 1 \quad (27)$$

Addicionalment, Dimitropoulos i Sorrell (2006) evidencien com alguns autors argumenten l'existència d'un efecte rebot respecte del temps (Binswanger, 2001; Sorrell, 2007), ja que una major demanda d'un determinat servei energètic pot produir un augment del temps destinat al seu consum. Si bé aquest raonament és cert per a determinats serveis energètics com el transport privat, perdria validesa per a altres serveis energètics per als quals un increment en la seva demanda no té perquè implicar un increment significatiu del temps dedicat al seu consum (com per exemple la calefacció o la refrigeració domèstiques).

Capítol 4

ESTIMACIONS DE L'EFECTE REBOT DIRECTE PER AL CONSUM D'ELECTRICITAT A LES LLARS A CATALUNYA

En aquest capítol es desenvolupa l'anàlisi empírica per a obtenir una aproximació de l'efecte rebot directe a les llars a Catalunya. Concretament, s'ha realitzat una estimació de l'efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars. Per a Catalunya s'ha realitzat, addicionalment, una altra estimació de l'efecte rebot per a climatització per a refrigeració domèstica. No es té constància de cap treball que realitzi una estimació de l'efecte rebot directe a Catalunya ni a Espanya.⁵

S'ha realitzat l'estimació de l'efecte rebot directe per dues vies, en primer lloc s'ha estimat l'efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars i per a la climatització domèstica, amb una sèrie anual de dades agregades pel conjunt de Catalunya. Posteriorment, s'ha realitzat una estimació de l'efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars amb dades de panell d'un conjunt de municipis de Catalunya. El fet que els preus de l'electricitat no variïn entre municipis no ha permès realitzar una anàlisi *cross-section*.

4.1. Variables i dades utilitzades

Un dels principals problemes detectats durant la recerca ha estat la dificultat en l'obtenció de dades, especialment les que fa referència al consum d'energia dels serveis energètics específics a les llars, dades sobre eficiència energètica o dades sobre treball útil.

La inexistència o poca fiabilitat d'algunes dades ha fet que les estimacions economètriques s'hagin fet a partir de les derivacions desenvolupades en el capítol 3, concretament, a partir d'estimacions d'elasticitats preu de la demanda d'electricitat per

⁵ A part de Freire-González (2010), derivat de la recerca duta a terme en aquesta tesi.

als serveis energètics que la utilitzen.

En aquest apartat es descriuen les variables obtingudes en la fase de recerca de dades, que han estat necessàries per realitzar posteriorment les estimacions economètriques.

4.1.1. Consum d'energia elèctrica a les llars

L'anàlisi empírica de l'efecte rebot realitzada per a Catalunya s'ha escollit fer-la a partir del consum d'energia elèctrica a les llars, ja que aquesta és una variable que s'ha pogut obtenir de l'ICAEN, a diferència d'altres com dades sobre els serveis energètics o l'eficiència energètica, no disponibles en el detall desitjables per a fer unes estimacions prou robustes sobre l'efecte rebot directe.

La demanda d'energia elèctrica és la variable clau a explicar en les estimacions de les elasticitats preu, a partir de les quals s'obtindrà una aproximació de l'efecte rebot directe per a l'electricitat a les llars a Catalunya. Per tant, aquesta serà la variable endògena dels models que s'especificaran.

A continuació es mostra la tipologia de dades de consum d'electricitat a les llars que s'han obtingut.

4.1.1.1. *Consum d'energia elèctrica a les llars a Catalunya per municipis*

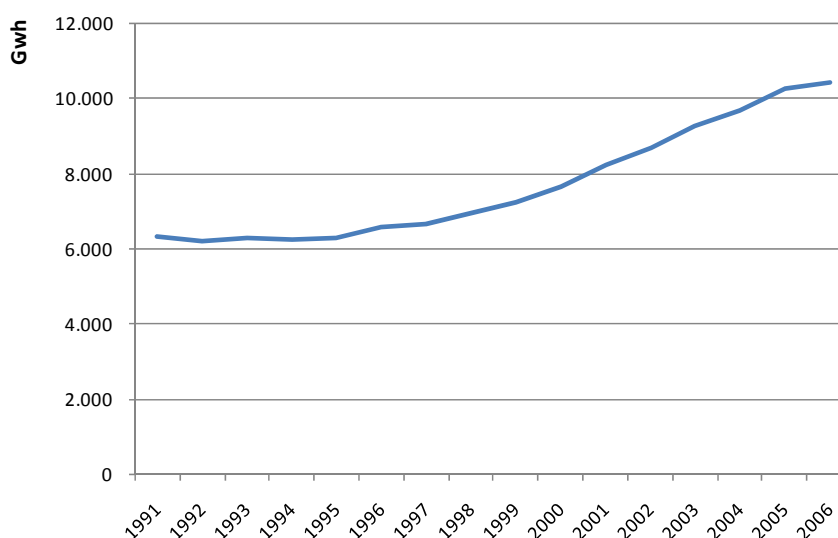
S'ha obtingut de l'Institut Català de l'Energia (ICAEN) una sèrie anual pel període que va des del 1992 al 2002 del consum d'energia elèctrica a les llars de gairebé tots els municipis de Catalunya. Aquesta és una valuosa font d'informació donat que mostra la variabilitat temporal (al llarg del temps) i transversal (entre municipis) de la variable considerada.

Aquesta informació resulta útil per a obtenir estimacions a partir de metodologies d'estimació de dades de panell, les quals proporcionen resultats més robustos que les estimacions realitzades únicament amb sèries temporals o amb dades transversals, per la gran quantitat d'informació incorporada a les estimacions.

4.1.1.2. Consum total d'energia elèctrica a les llars a Catalunya

D'altra banda, i donat que la informació per municipis no es disposa per a la totalitat de Catalunya, s'han obtingut de l'ICAEN dades del consum total anual d'energia elèctrica a les llars a Catalunya pel període que va des del 1991 al 2006. El Gràfic 5 mostra l'evolució d'aquesta variable.

Gràfic 5. Evolució del consum anual d'energia elèctrica a les llars catalanes, 1991-2006



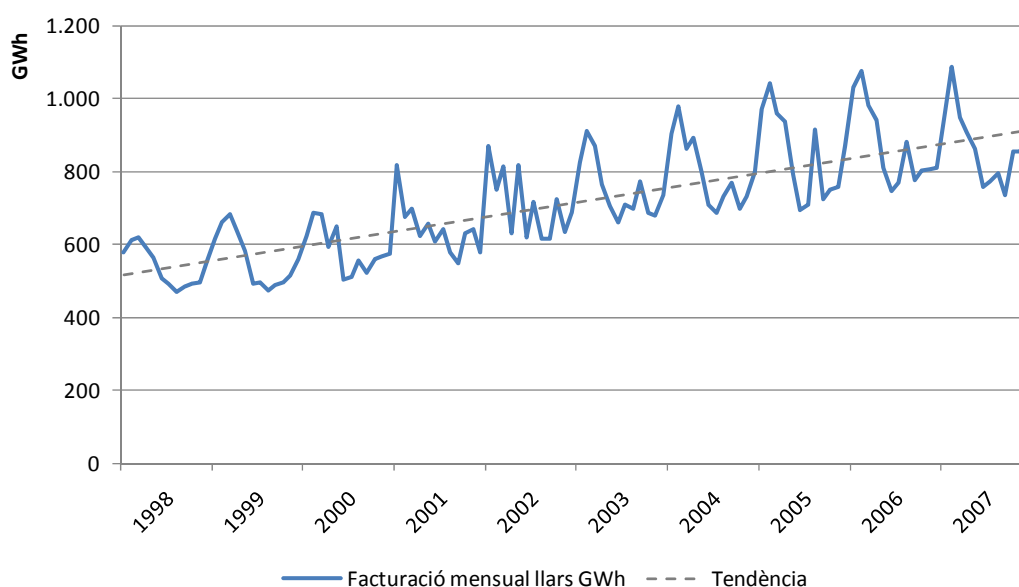
Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Institut Català d'Energia. Departament d'Economia i Finances.

S'observa com, durant el període en consideració, el consum total d'energia elèctrica a les llars ha experimentat una tendència creixent, i com aquest creixement s'ha accentuat els

darrers anys.

D'altra banda, s'han obtingut de l'Institut d'Estadística de Catalunya (IDESCAT) dades de la facturació mensual d'energia elèctrica a les llars a Catalunya pel període que va del gener del 1998 al desembre del 2007. Malgrat els totals anuals de les dues fonts difereixen lleugerament en els resultats, aquestes últimes dades permeten observar la gran variabilitat intermensual que es produeix en el consum elèctric domèstic (veure Gràfic 6).

Gràfic 6. Evolució del consum mensual d'energia elèctrica a les llars catalanes, 1998-2007.



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Institut d'Estadística de Catalunya.

S'observa com els mesos més freds de l'any (aproximadament d'octubre a març), el consum d'energia elèctrica és major que els mesos més calorosos de l'any. Aquest esquema es repeteix, en major o menor mesura, tots els anys i pot ser indicatiu de la importància que té el consum elèctric per a calefacció a les llars, tot i que també reflectiria altres aspectes com el fet que durant els mesos més freds es passa més temps a l'interior de les llars, incrementant el consum energètic global, o la menor quantitat de llum natural durant el mateix període. Aquesta variabilitat s'accentua els últims anys del

període analitzat.

4.1.1.3. Consum d'energia elèctrica en refrigeració per a climatització domèstica a Catalunya

Addicionalment al consum total anual d'energia elèctrica a les llars, s'ha pogut derivar la part d'aquest consum elèctric destinat a la refrigeració de les llars per a Catalunya.

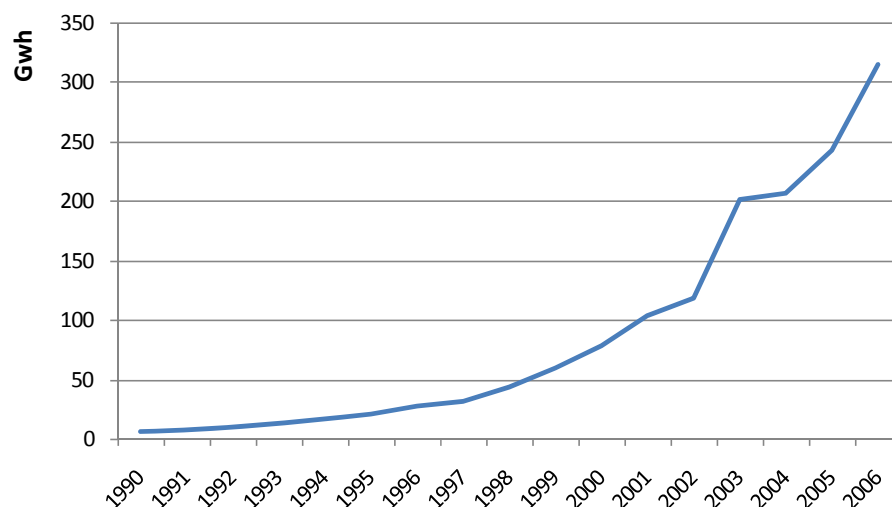
Per una banda, s'ha obtingut de l'ICAEN dades anuals de la proporció total d'energia elèctrica de les llars destinada a refrigeració domèstica a Catalunya des del 1997 fins al 2006. Per altra banda, s'ha obtingut del mateix organisme, dades del consum total d'energia elèctrica a les llars a Catalunya, pels mateixos anys.

Aplicant la proporció corresponent al consum total, s'ha obtingut el consum energètic domèstic anual per a refrigeració a Catalunya per al període 1997-2006. Donada la definida tendència exponencial que mostra l'evolució d'aquest consum, s'ha extrapolat aquest consum pel període que va de 1990 a 1996 a partir de l'equació $Y = 27,14 * \exp(0,25 * x)$ que ajusta les dades amb un coeficient de determinació del 0,984.⁶

Tenint en compte que la refrigeració domèstica només utilitza energia elèctrica, s'ha suposat que tot el consum resultant és d'electricitat. El Gràfic 7 mostra l'evolució d'aquest consum a Catalunya a partir de dades anuals.

⁶ Addicionalment, s'ha constatat aquesta tendència exponencial que ha seguit el consum d'energia per refrigeració domèstica durant el període extrapolat, a partir de converses amb tècnics experts de l'ICAEN.

Gràfic 7. Evolució del consum elèctric per a refrigeració a les llars a Catalunya, 1990-2006



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Institut Català d'Energia. Departament d'Economia i Finances.

S'observa l'important creixement que ha experimentat el consum d'energia per a refrigeració a les llars durant el període en consideració, especialment per als darrers anys. Aquest ha estat un període de gran expansió de la refrigeració domèstica a Catalunya, on ha passat de ser un servei energètic "de luxe" a estar molt més a l'abast de la població, i on encara la població es trobava lluny del nivell màxim de confort tèrmic, o de la "saciació", com indica el Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015 (Departament de Treball i Indústria, 2006). Això provocaria estimacions elevades de l'efecte rebot per aquesta via, en aquest àmbit, per al període en consideració.

També cal tenir en compte que, malgrat el gran creixement que ha experimentat el consum d'energia d'aquest ús, aquest encara representa una minsa proporció del consum total d'energia a les llars (veure Gràfic 3).

4.1.2. Preus de l'energia elèctrica i del gas natural

Per a obtenir estimacions de l'efecte rebot directe, a partir d'estimacions

economètriques, segons el desenvolupament analític del capítol 3, és a dir, estimant elasticitats preu de la demanda d'energia pel servei energètic, una de les variables clau és el preu de l'energia.

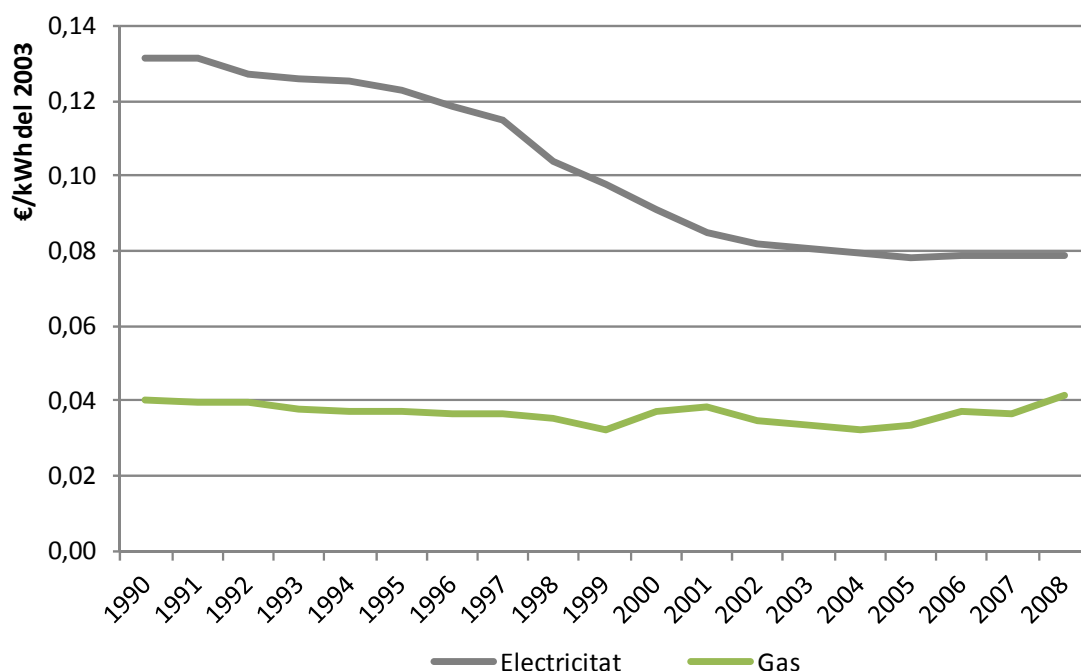
Donat que les dades de consum energètic que es disposa són de consum d'electricitat a les llars, la variable clau en aquest cas seria el preu de l'electricitat i dels seus possibles substitutius, com el gas natural.

El mercat de l'electricitat és un mercat regulat a Espanya. En un període determinat hi ha el mateix preu marginal de l'electricitat a tota la geografia espanyola. Això fa que no es produeixi variabilitat entre municipis o entre comunitats autònomes, el que dificultaria realitzar estimacions de l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat a través d'una anàlisi purament transversal (*cross-section*).

Per a construir una sèrie dels preus de l'electricitat i del gas natural s'han obtingut les respectives tarifes, per a usuaris domèstics a partir d'una revisió dels Boletín Oficial del Estado (BOE), analitzant els Reials Decrets on surten regulades les tarifes corresponents.

D'aquesta manera s'han calculat les mitjanes anuals de les tarifes marginals tant d'electricitat com de gas del mateix període pels que es disposa de dades de consums d'electricitat total a les llars i consum d'electricitat per a refrigeració. El Gràfic 8 mostra l'evolució de la mitjana de la tarifa marginal anual d'electricitat i de gas natural aplicada als usuaris domèstics entre el 1990 i el 2008.

Gràfic 8. Evolució de la mitjana anual de la tarifa marginal d'electricitat i de gas natural aplicada a les llars, 1990-2008. Euros constants del 2003



Font: elaboració pròpia a partir de diversos BOE.

S'observa com, a preus constants del 2003, la tarifa d'electricitat té una tendència decreixent durant la primera part del període analitzat, mentre que es manté constant durant l'últim tram del període. La tarifa de gas manté una tendència força constant durant el període.

La utilització del preu de l'electricitat en les estimacions econòmriques de l'efecte rebot directe a partir de l'estimació d'elasticitats preu de la demanda d'electricitat proporcionaria uns resultats que sembla que no conduirien, per aquesta via, a una sobreestimació de l'efecte rebot.

Com s'ha exposat amb més detall en el capítol 3, la hipòtesi de què l'eficiència energètica no és afectada pels preus de l'energia (necessària per a derivar l'efecte rebot de les elasticitats preu) deixa de ser aplicable en períodes d'increments dels preus de l'energia,

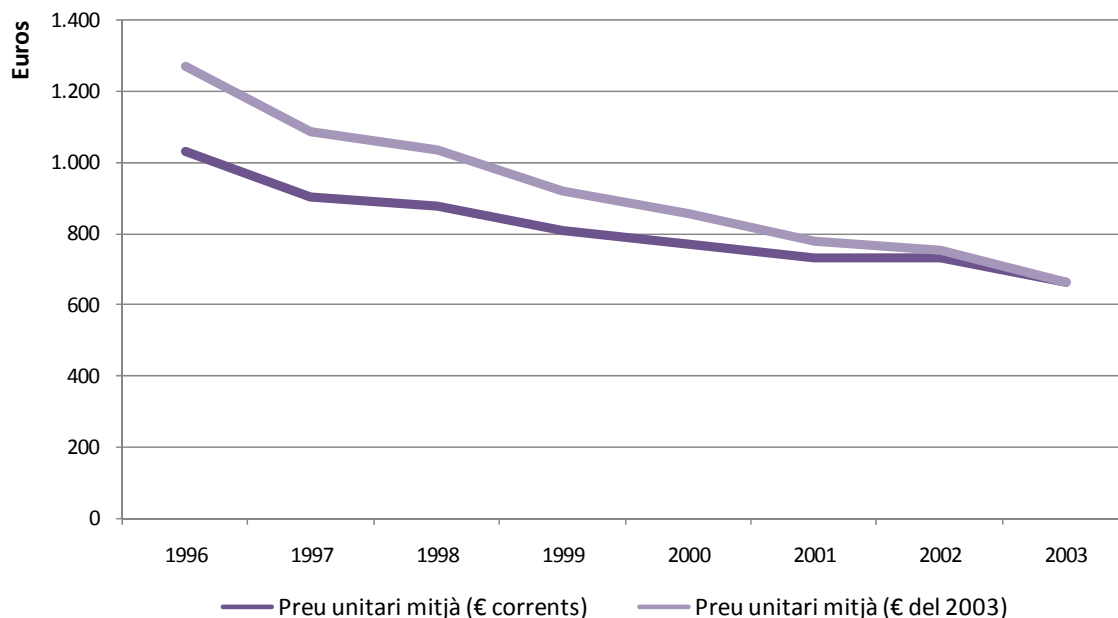
ja que aquests increments induïrien a millores tecnològiques no reversibles (Dargay, 1992; Grubb, 1995; Sorrell, 2007).

La tarifa de gas natural mostra una tendència constant durant tot el període, el que fa pensar que tampoc induiria progressos tecnològics que milloressin l'eficiència, i també resultaria útil a efectes de ser utilitzada en les estimacions.

4.1.3. Preu dels aparells de refrigeració domèstica

A continuació s'ha calculat l'evolució del preu mitjà dels aparells de refrigeració domèstica pel període 1996 - 2003. S'ha obtingut un preu mitjà anual a partir de dades de facturació total anual d'aparells domèstics d'aire condicionat i del número total d'unitats domèstiques venudes a Espanya, de l'Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC). El Gràfic 9 mostra l'evolució que ha seguit aquest preu.

Gràfic 9. Evolució del preu unitari mitjà dels aparells domèstics d'aire condicionat a Espanya, 1996-2003



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'AFEC.

S'observa clarament una tendència decreixent del preu unitari mitjà dels aparells domèstics de refrigeració a Espanya, fet que hauria pogut incentivar una major penetració d'aquest tipus d'aparells a les llars i consegüentment augmentar el consum d'energia realitzat en aquest servei energètic. Això proporcionaria unes elevades estimacions de l'efecte rebot per la via dels consumidors "marginals", és a dir, aquella proporció de la població que anteriorment no podia accedir al servei energètic i ara en pot disposar per l'abaratiment del cost dels aparells.

Malgrat això, no s'han pogut obtenir per a aquesta variable dades d'anys anteriors a 1996 que permetrien la inclusió d'aquesta variable en les anàlisis econòmriques anuals per a Catalunya, considerant, a més dels costos energètics, els costos de capital. La no inclusió dels costos de capital provocaria una infraestimació de l'efecte rebot si aquests són decreixents amb la millora de l'eficiència, a l'hora de derivar-lo per la via de l'estimació d'elasticitats preu (veure apartat 3.3.3.1).

4.1.4. Variables climàtiques

Un aspecte important a l'hora de realitzar estimacions del consum energètic a les llars és controlar els efectes climàtics. Això és degut a la importància que tenen les condicions climàtiques sobre el consum energètic per a climatitzar la llar, especialment en calefacció i refrigeració.

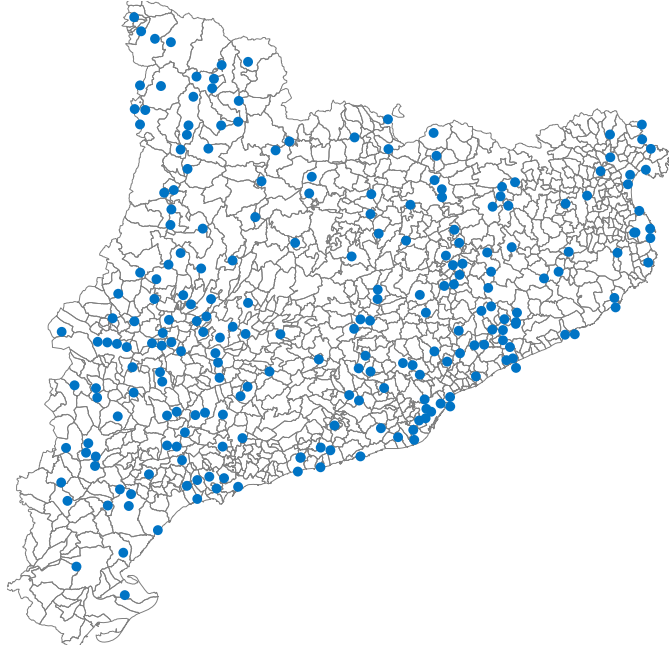
Donades les dificultats d'establir un criteri per a considerar les condicions climàtiques en les estimacions economètriques, s'ha optat per a calcular, per al període d'anàlisi considerat, els graus-dia de calefacció (HDD, en anglès, *heating degree-days*) i de refrigeració (CDD, en anglès, *cooling degree-days*) a Catalunya, ja que és una variable àmpliament utilitzada en la literatura empírica sobre estimacions d'elasticitats preu de la demanda d'energia i de l'efecte rebot. Aquesta és una variable que té una gran capacitat per a recollir els aspectes climàtics que afecten el consum d'energia a les llars.

Els graus-dia de calefacció i de refrigeració són una mesura del nombre de graus centígrads (o altres) en què diàriament no s'arriba (per a calefacció), o bé se supera (per a refrigeració) un llindar de temperatura prèviament establert.⁷ Per al seu càlcul s'han obtingut dades de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) de les temperatures màximes i mínimes diàries de 244 estacions meteorològiques repartides per la geografia catalana, per al període 1990-2003.

Els llindars (temperatura base (T_{base})) que s'han establert han estat de 21°C per a calefacció i de 15°C per a refrigeració. Aquestes són les temperatures de referència per a la determinació dels graus-dia de calefacció i de refrigeració segons la norma UNE relativa a les condicions climàtiques per a projectes.

⁷ Per a més informació sobre graus-dia, mètodes de càlcul i una aplicació a Catalunya, veure Margarit *et al.* (2003).

Gràfic 10. Estacions meteorològiques de les quals es disposa de dades a Catalunya



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'AEMET.

Per al càlcul dels graus-dia de calefacció s'han utilitzat les fórmules de la Taula 6, mentre que per al càlcul dels graus-dia per a refrigeració s'han utilitzat les fórmules de la Taula 7.

Taula 6. Càlcul dels graus-dia calefacció segons la condició que es produeixi.

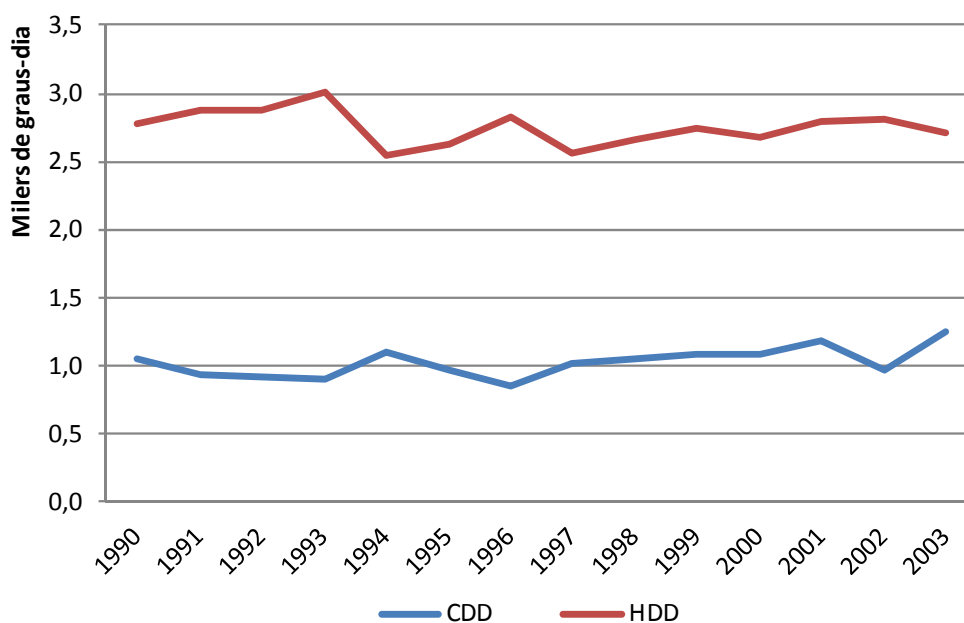
Condició	Fórmula utilitzada
$T_{\min} > T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = 0$
$(T_{\max} + T_{\min}) / 2 > T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = (T_{\text{base}} - T_{\min}) / 4$
$T_{\max} \geq T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = (T_{\text{base}} - T_{\min}) / 2 - (T_{\max} - T_{\text{base}}) / 4$
$T_{\max} < T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = T_{\text{base}} - (T_{\max} + T_{\min}) / 2$

Taula 7. Càlcul dels graus-dia refrigeració segons la condició que es produeixi.

Condicció	Fórmula utilitzada
$T_{\max} < T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = 0$
$(T_{\max} + T_{\min}) / 2 < T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = (T_{\max} - T_{\text{base}}) / 4$
$T_{\min} \leq T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = (T_{\max} - T_{\text{base}}) / 2 - (T_{\text{base}} - T_{\min}) / 4$
$T_{\min} > T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = (T_{\max} + T_{\min}) / 2 - T_{\text{base}}$

A partir d'aquests càlculs s'han calculat els graus-dia a cada estació meteorològica al llarg de cada any analitzat, mitjançant una agregació d'aquests s'ha obtingut una mesura dels graus-dia calefacció i refrigeració. El Gràfic 11 mostra l'evolució de les dues variables a Catalunya, realitzant la mitjana de totes les estacions meteorològiques seleccionades.

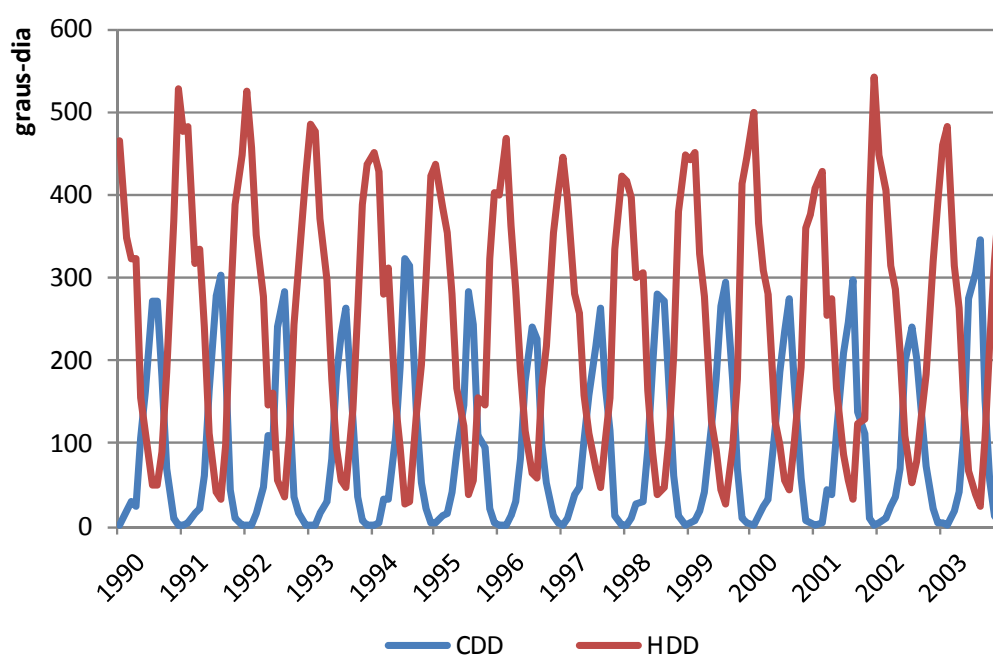
Gràfic 11. Evolució mitjana anual dels graus-dia calefacció i refrigeració a Catalunya, 1990-2003. Mitjana de les estacions meteorològiques seleccionades



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'AEMET.

A continuació, el Gràfic 12 mostra l'evolució mensual dels graus-dia de calefacció i de refrigeració a Catalunya. Aquesta mostra detalladament la gran variabilitat intermensual que es produeix en aquestes variables, fet no observable en una anàlisi anual.

Gràfic 12. Evolució mitjana mensual dels graus-dia calefacció i refrigeració a Catalunya, 1990-2003. Mitjana de les estacions meteorològiques seleccionades



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'AEMET.

S'observa com en els mesos més freds de l'any (aproximadament d'octubre a març) es produeix un increment considerable dels graus-dia calefacció i un decrement dels graus-dia refrigeració, mentre que durant els mesos més calorosos (aproximadament d'abril a setembre) succeeix el contrari.

4.1.5. Renda de les llars

Tal i com indica la literatura, una altra variable necessària per a portar a terme

estimacions de l'efecte rebot és la renda de les llars. Aquesta variable permet controlar aspectes relacionats amb l'evolució del benestar, així com l'increment del consum elèctric degut al major nombre d'aparells elèctrics i electrònics a les llars. Addicionalment, la inclusió d'aquesta variable en les estimacions permet l'obtenció i anàlisi d'elasticitats renda.

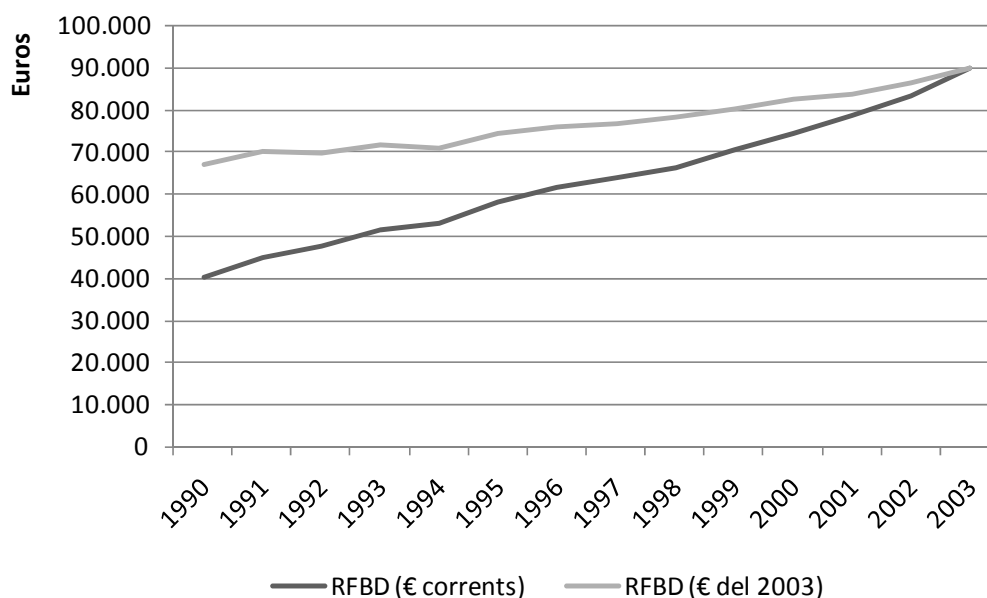
4.1.5.1. Renda Familiar Disponible Bruta (RFDB) municipal a Catalunya

S'han obtingut de l'IDESCAT dades sobre la RFDB de gairebé la totalitat dels municipis de Catalunya amb una població major de 5.000 habitants pels anys 1991 i 1996 i pel període 1999-2002. Per a obtenir la RFDB per a la resta d'anys s'ha realitzat una extrapolació per a cada municipi. Donat que l'evolució de la renda dels municipis té un comportament molt regular, les estimacions resultants no desvien la renda en cap sentit i resulten creïbles. D'altra banda, el fet de no disposar de dades dels municipis menors de 5.000 habitants podria introduir algun esbiaix a les estimacions, fent que l'efecte rebot resultant no fos vàlid per a aquelles llars situades a municipis més rurals de Catalunya.

4.1.5.2. Renda Familiar Disponible Bruta (RFDB) a Catalunya

S'han obtingut dades de la RFDB de Catalunya de l'IDESCAT pel període 2000-2005 en base 2000; del període 1995-2002, en base 1995; i del període 1990-1995, en base 1986. Donat que no es disposa d'una sèrie completa del període d'anàlisi (1990-2003) en una mateixa base, s'han enllaçat les sèries segons el procediment indicat per l'IDESCAT per a obtenir una sèrie pel període 1990-2003 en base 2000. Aquest procediment consisteix en aplicar les taxes de variació interanuals retrospectives a partir de la darrera sèrie disponible (veure Gràfic 13).

Gràfic 13. Evolució de la RFDB a Catalunya, 1990-2003. Base 2000.



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'IDESCAT.

S'observa un creixement sostingut de la renda de les llars durant el període d'anàlisi, tot i que en termes reals aquest ha estat menor. Aquest fet podria influenciar les estimacions sobre l'efecte rebot a partir d'estimacions d'elasticitats preu de la demanda d'electricitat, pel que s'hauria d'incorporar aquesta variable a les estimacions.

4.2. Estimacions de l'efecte rebot directe amb dades agregades de tot Catalunya

Seguint a Khazzoom (1980), en l'anàlisi empírica es limitarà el significat de l'efecte rebot directe al nivell microeconòmic. En aquest nivell, una millora tecnològica que millorés l'eficiència en el consum d'energia reduiria, *ceteris paribus*, el cost dels serveis energètics proporcionats pels aparells que han millorat l'eficiència.

Com s'ha analitzat al capítol 3, des de que Khazzoom ho va suggerir el 1980, molts economistes han utilitzat l'elasticitat preu de la demanda d'energia com una bona variable *proxy* de l'efecte rebot directe. Aquesta variable permet portar a terme una

estimació indirecta de l'efecte rebot directe, és a dir, sense necessitat de dades d'eficiència energètica.

Donada la disponibilitat de dades, i com indiquen Haas i Biermayr (2000), les elasticitats preu i renda es poden estimar utilitzant la següent funció de demanda d'elasticitats constants dinàmica estàndard, a partir d'especificar una forma funcional doble-logarítmica. De manera simplificada i genèrica es pot formalitzar com:

$$\ln E_t = \mu + \beta_1 \ln P_t + \beta_2 \ln Y_t + \beta_3 \ln HDD_t + \beta_4 \ln E_{t-1} \quad (28)$$

on E_t és el consum d'energia del període t , P_t és el preu de l'energia el període t , Y_t és la variable de renda, HDD_t és la variable climàtica (en aquest cas els graus-dia de calefacció i/o refrigeració) i E_{t-1} és el consum d'energia del període $t-1$. Aquesta última variable captura els efectes a llarg termini.

En primer terme s'han realitzat dues estimacions amb dades agregades per al conjunt de Catalunya. La primera estimació s'ha realitzat per al conjunt de serveis energètics que utilitzen energia elèctrica a les llars a Catalunya per al període 1991-2003, amb la forma funcional que mostra l'equació 29.

$$\ln C_{E_t} = \mu + \beta_1 \ln P_{E_t} + \beta_2 \ln Y_t + \beta_3 \ln HDD_t + \beta_4 \ln C_{E_{t-1}} \quad (29)$$

On C_{E_t} és el consum d'energia elèctrica a les llars l'any t , P_{E_t} és la mitjana anual del preu marginal de l'electricitat domèstica l'any t , Y_t és la renda familiar disponible bruta l'any t , HDD_t són els graus-dia de calefacció de l'any t , i $C_{E_{t-1}}$ és consum d'energia elèctrica a les llars l'any $t-1$.

La segona especificació s'ha desenvolupat per a la climatització domèstica, per a estimar

el consum d'electricitat utilitzat per a refrigeració domèstica a Catalunya pel període 1991-2003, amb la forma funcional que mostra l'equació (30):

$$\ln E_{R_t} = \mu + \beta_1 \ln P_{E_t} + \beta_2 \ln Y_t + \beta_3 \ln CDD_t + \beta_4 \ln E_{R_{t-1}} \quad (30)$$

On E_{R_t} és el consum d'energia elèctrica per a refrigeració a les llars l'any t , P_{E_t} és la mitjana anual del preu marginal de l'electricitat de l'electricitat domèstica l'any t , Y_t és la Renda Familiar Disponible Bruta l'any t , CDD_t són els graus-dia de refrigeració de l'any t , i $E_{R_{t-1}}$ és consum d'energia elèctrica a les llars l'any $t-1$.

A continuació, la Taula 8 mostra els resultats de l'estimació de la demanda total d'energia elèctrica a les llars pel mètode dels Mínims Quadrats Ordinaris (MQO).

Taula 8. Estimació de la demanda total d'energia elèctrica a les llars. Dades agregades de Catalunya.

Dependent Variable: $\ln(C_{E_t})$

Sample (adjusted): 1992 2003

Included observations: 12 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln(P_{E_t})$	-0,207442	0,054912	-3,777688	0,0069
$\ln(Y_t)$	0,382543	0,045388	8,428386	0,0001
$\ln(HDD_t)$	0,155599	0,037655	4,132185	0,0044
$\ln(C_{E_{t-1}})$	0,600241	0,069698	8,612035	0,0001
μ	-3,562908	0,761442	-4,679158	0,0023
R-squared	0,998634	Mean dependent var		8,869514
Adjusted R-squared	0,997853	S,D, dependent var		0,140705
S.E. of regression	0,006520	Akaike info criterion		-6,933671
Sum squared resid	0,000298	Schwarz criterion		-6,731626
Log likelihood	46,60202	F-statistic		1279,140
Durbin-Watson stat	3,041650	Prob(F-statistic)		0,000000

A continuació, la Taula 9 mostra els resultats de l'estimació de la demanda d'energia elèctrica per a refrigeració a les llars pel mètode dels Mínims Quadrats Ordinaris.

Taula 9. Estimació de la demanda total d'energia elèctrica per a refrigeració a les llars.
Dades agregades de Catalunya.

Dependent Variable: $\ln(E_{R_t})$

Sample: 1991 2003

Included observations: 13

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln(P_{E_t})$	-0,864602	0,189781	-4,555780	0,0014
$\ln(Y_t)$	4,623342	0,072094	64,12928	0,0000
$\ln(CDD_t)$	0,506111	0,126832	3,990415	0,0032
μ	-56,92428	2,204937	-25,81674	0,0000
R-squared	0,998893	Mean dependent var		3,568302
Adjusted R-squared	0,998524	S.D. dependent var		1,022394
S.E. of regression	0,039283	Akaike info criterion		-3,388383
Sum squared resid	0,013888	Schwarz criterion		-3,214552
Log likelihood	26,02449	F-statistic		2706,468
Durbin-Watson stat	2,295961	Prob(F-statistic)		0,000000

Nota: finalment no s'ha inclòs la variable $E_{R_{t-1}}$ en les estimacions, ja que no resultava significativa.

S'observa com els coeficients estimats de les dues estimacions resulten significatius, tant de manera individual com conjunta i els coeficients de determinació són propers a la unitat. L'estimació realitzada pel conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars podria presentar problemes d'autocorrelació. Donat que hi ha poques observacions, ambdues estimacions resulten poc robustes.

Caldria realitzar una anàlisi de les arrels unitàries de les sèries i transformar-les, si fos necessari, per a assegurar que fossin estacionàries, però les poques observacions anuals

amb les que s'han realitzat les estimacions fan que aquesta anàlisi resulti impracticable.

De les estimacions resulten unes elasticitats preu de la demanda de -0,21 a curt termini i de -0,52 a llarg termini pel que fa la demanda total d'electricitat a les llars. Pel que fa la demanda d'energia elèctrica per a refrigeració s'ha obtingut una elasticitat preu de la demanda a llarg termini de -0,86.

Aquests resultats portarien a unes estimacions de l'efecte rebot directe del 21% a curt termini i del 52% a llarg termini, pel que fa el conjunt de serveis energètics que consumeixen electricitat a les llars a Catalunya, és a dir, una millora de l'eficiència energètica global que potencialment hagués de reduir la demanda d'energia d'electricitat un 10% en aquests serveis energètics, portaria a una reducció efectiva de la demanda d'energia del 7,9% en el curt termini i del 4,8% en el llarg termini; o el que és el mateix, el 21% a curt termini, i el 52%, a llarg termini, dels estalvis potencials del consum d'electricitat derivats d'una millora de l'eficiència energètica no es farien efectius degut a l'existència d'un efecte rebot directe.

Pel que fa la refrigeració domèstica es produiria un efecte rebot directe a llarg termini del 86%, el que faria que una millora de l'eficiència energètica dels aparells d'aire condicionat que hagués de reduir potencialment el consum d'electricitat en aquest àmbit en un 10%, acabaria produint només un estalvi real d'electricitat de l'1,4%.

Cal tenir en compte que les poques observacions amb les que s'han realitzat les estimacions (dades anuals per a un període de 13 anys) fan perdre validesa als resultats obtinguts per les estimacions, pel que, en posteriors recerques caldria realitzar les estimacions amb sèries més llargues que proporcionessin uns resultats més robustos. Això ha estat degut a la gran dificultat en l'obtenció de les dades anuals, especialment les de consum d'electricitat, consum d'electricitat per refrigeració a les llars i dades climàtiques.

4.3. Estimacions de l'efecte rebot directe del consum d'electricitat a les llars a Catalunya amb dades per municipi

Addicionalment a les anàlisis econòmiques anuals per Catalunya en conjunt, s'ha realitzat, amb les dades d'un panell de municipis de Catalunya, una estimació de l'efecte rebot directe per al conjunt de serveis energètics que consumeixen electricitat a les llars. Aquestes estimacions amb dades de panell contenen moltes observacions, pel que proporcionen resultats més robustos que les estimacions realitzades en l'apartat 4.2 amb dades agregades de Catalunya.

Es disposa de dades municipals de consum elèctric a les llars, de preus de l'electricitat domèstica i preus de les tarifes de gas natural domèstiques (els preus de l'electricitat i del gas no varien entre municipis ni entre Comunitats Autònomes, però sí que ho fan al llarg del temps), de RFDB, de graus-dia calefacció i de graus-dia refrigeració per a 43 municipis de Catalunya pel període 1991-2002.

De tots els municipis de Catalunya, aquests 43 són aquells pels quals es disposa de totes les variables necessàries per a alimentar els models especificats. Les variables monetàries han estat deflactades per a obtenir-les a preus constants del 2003.

Amb aquestes dades s'ha estimat el Model d'Efectes Fixos (MEF) que mostra la següent especificació del model originari:

$$\ln C_{it} = \mu_i + \beta_1 \ln P_{E_{it}} + \beta_2 \ln P_{G_{it}} + \beta_3 \ln Y_{it} + \beta_4 \ln HDD_{it} + u_{it}$$

On C_{it} és el consum d'energia elèctrica a les llars del municipi i en el període t , $P_{E_{it}}$ és el preu de l'energia elèctrica al municipi i en el període t , $P_{G_{it}}$ és el preu domèstic del gas natural al municipi i en el període t , Y_{it} és la Renda Familiar Disponible Bruta del municipi

i en el període t , i HDD_{it} són els graus-dia de calefacció de l'estació meteorològica del municipi i en el període t .

L'estimació del model d'efectes fixos s'ha realitzat amb ponderacions *cross-section* (*cross-section weights*), és a dir, realitzant una estimació conjunta per Mínims Quadrats Generalitzats (MQG), aprofitant la informació aportada per la matriu de variàncies i covariàncies dels termes de pertorbació de les estimacions individuals. En les estimacions realitzades: $\mu_i = \mu + \alpha_i$.

La Taula 10 mostra les estimacions que inclouen els preus del gas natural del MEF realitzades amb el mètode dels MQG amb *cross-section weights*.

Taula 10. Estimació d'un MEF de la demanda total d'energia elèctrica a les llars incloent-hi el preu del gas. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (*cross-section weights*).

Variable*	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln(P_{E_{it}})$	-0,5005	0,0271	-18,4951	0,0000
$\ln(P_{G_{it}})$	0,0659	0,0420	1,5691	0,1173
$\ln(Y_{it})$	0,4395	0,0365	12,0273	0,0000
$\ln(HDD_{it})$	0,0314	0,0114	2,7553	0,0061
μ	3,4607	0,4283	8,0792	0,0000
Weighted Statistics				
R-squared	0,99987	Mean dependent var		12,27361
Adjusted R-squared	0,99985	S.D. dependent var		4,942576
S.E. of regression	0,06011	Sum squared resid		1,694709
F-statistic	75.679,02	Durbin-Watson stat		1,187337
Prob(F-statistic)	0,0000			

* Aquesta taula només presenta els coeficients β i μ comuns a tots els municipis.

A continuació la Taula 11 mostra les estimacions del MEF realitzades amb MQG (*cross-section weights*), però sense incloure el preu del gas natural, ja que aquesta variable no ha resultat ser individualment significativa.

Taula 11. Estimació d'un MEF de la demanda total d'energia elèctrica a les llars sense incloure el preu del gas. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (*cross-section weights*)

Variable*	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln(P_{E_{it}})$	-0,4946	0,0264	-18,7249	0,0000
$\ln(Y_{it})$	0,4332	0,0366	11,8412	0,0000
$\ln(HDD_{it})$	0,0305	0,0113	2,7061	0,0071
μ	3,3552	0,4219	7,9520	0,0000
Weighted Statistics				
R-squared	0,9999	Mean dependent var		12,35678
Adjusted R-squared	0,9999	S.D. dependent var		5,026793
S.E. of regression	0,0604	Sum squared resid		1,714663
F-statistic	79.257,16	Durbin-Watson stat		1,16974
Prob(F-statistic)	0,0000			

* Aquesta taula només presenta els coeficients β i μ comuns a tots els municipis. L'Annex. Municipis utilitzats a les estimacions de panell i valors estimats dels termes independents individuals del Model d'Efectes Fixos, presenta els valors α_i i μ_i individuals per a cada municipi.

Les estimacions de la Taula 11, que no inclouen la variable que contempla els preus del gas natural, són les que es consideraran com a vàlides, donat que el coeficient estimat del preu del gas de la Taula 10 no ha resultat significatiu.

A continuació, s'ha transformat el model de la Taula 11 en un Model de Mecanisme de Correcció d'Error (MCE), realitzant una estimació en diferències:

$$\Delta \ln C_{it} = \delta_1 \Delta \ln P_{E_{it}} + \delta_3 \Delta \ln Y_{it} + \delta_4 \Delta \ln HDD_{it} + \delta_5 \Delta \ln C_{it-1} + \tau u_{it-1} + \varepsilon_{it}$$

on u_{t-1} són els residus resultants de l'estimació de la Taula 11 retardats un període i que representa el terme de correcció d'error del model. Aquest nou model s'ha estimat per MQG (amb *cross-section weights*), amb els coeficients estimats comuns a tots municipis (Taula 12).

Taula 12. Estimació d'un MCE de la demanda total d'energia elèctrica a les llars. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (*cross-section weights*).

Dependent Variable: $\Delta \ln(C_{it})$

Sample (adjusted): 1993 – 2002

Included observations: 10 after adjustments

Cross-sections included: 43

Total pool (balanced) observations: 430

Linear estimation after one-step weighting matrix

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\Delta \ln(P_{E_{it}})$	-0,3568	0,0594	-6,0096	0,0000
$\Delta \ln(Y_{it})$	0,4299	0,0851	5,0519	0,0000
$\Delta \ln(HDD_{it})$	0,0198	0,0101	1,9639	0,0502
$\Delta \ln(C_{it-1})$	0,1062	0,0364	2,9173	0,0037
u_{it-1}	-0,5719	0,0448	-12,7552	0,0000
Weighted Statistics				
R-squared	0,42693	Mean dependent var		0,04638
Adjusted R-squared	0,42154	S.D. dependent var		0,06115
S.E. of regression	0,04651	Sum squared resid		0,91937
F-statistic	79,15	Durbin-Watson stat		1,80161
Prob(F-statistic)	0,0000			

En aquest cas, la significativitat del terme de correcció d'error indica que les sèries estan cointegrades. S'observa com tots els coeficients estimats resulten significatius. Com que l'estimació s'ha realitzat en diferències, el coeficient de determinació resulta menor i, per tant, no resta vàlida als resultats obtinguts. Els resultats proporcionats pels

d'estadístics, els mètodes d'estimació utilitzats i la gran quantitat d'observacions introduïdes, en aquest cas, fan considerar aquestes estimacions com a vàlides, donat que resulten més robustes que les d'apartats anteriors.

Les estimacions proporcionades a la Taula 11 pel MEF estimat en nivells proporciona els resultats de les elasticitats a llarg termini, mentre que els resultats de les estimacions proporcionades a la Taula 12 pel MCE estimat en diferències proporciona els resultats de les elasticitats a curt termini.

D'aquestes resulten unes elasticitats preu de la demanda d'electricitat de -0,36 a curt termini, i de -0,49 a llarg termini. L'elasticitat renda resulta de 0,43, tant a curt termini com a llarg termini.

Aquests resultats portarien a unes estimacions de l'efecte rebot directe per al conjunt de serveis energètics que utilitzen energia elèctrica a les llars del 36% a curt termini i del 49% a llarg termini, el que faria que un increment de l'eficiència energètica global en aquests serveis que hagués de produir un estalvi del consum d'electricitat de 10, acabaria produint un estalvi de 6,4 a curt termini i de 4,9 a llarg termini. Aquests resultats difereixen lleugerament dels obtinguts a l'apartat 4.2 d'estimacions amb dades agregades per tot Catalunya (on s'ha estimat un efecte rebot del 21% a curt termini i del 52% a llarg termini), especialment pel que fa el curt termini. Els resultats de les estimacions de panell però, resulten més robustos, tant pels mètodes, com donada la gran quantitat d'observacions que incorporen, pel que seran aquests els que es consideraran com a vàlids.

4.4. Resum d'estimacions de l'efecte rebot directe

De les estimacions realitzades en els apartats anteriors es pot resumir que l'efecte rebot

per al conjunt de serveis energètics que utilitzen energia elèctrica a les llars catalanes seria del 36% a curt termini i del 49% a llarg termini. Pel cas de la refrigeració domèstica per a climatització a Catalunya s'ha trobat un efecte rebot directe del 86%, però, com s'ha indicat, els resultats per a la refrigeració domèstica no són prou robustos ni concloents.

Com indica Sorrell (2007), l'elasticitat estimada per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat estaria mostrant com, un increment de l'eficiència "global" de l'ús de l'electricitat a les llars portaria a l'efecte rebot estimat, però també podria estar suggerint que l'efecte rebot directe d'aquells serveis energètics que dominen el consum global d'electricitat (com podria ser la calefacció en el cas de les llars catalanes) seria de l'ordre d'aquella magnitud.

Cal tenir en compte que, donades les definicions desenvolupades en el capítol 3, a partir de les quals s'han derivat les estimacions de l'efecte rebot, aquest podria resultar:

1. Sobreestimat: pel possible relaxament de les hipòtesis d'endogeneïtat de l'eficiència energètica, és a dir, que l'eficiència energètica no es veu afectada per canvis en els preus energètics; i de simetria, és a dir, que els consumidors responen de la mateixa manera a increments (decrements) en l'eficiència energètica que a decrements (increments) dels preus energètics. Aquestes hipòtesis són necessàries per a poder considerar l'elasticitat preu de la demanda de l'energia dels serveis energètics com una mesura de l'efecte rebot directe.

Així com la primera no hauria de sobreestimar els resultats obtinguts, pel fet que s'han realitzat en un període de decreixement dels preus energètics que, segons la literatura, no afectaria l'eficiència energètica, la segona hipòtesi (de simetria) seria més discutible, i podria afectar les estimacions en alguna mesura.

2. Infraestimat: donada la relació entre l'efecte rebot i els costos de capital (equació (19)), i la tendència decreixent que mostren els preus dels aparells d'aire condicionat al llarg del

període en consideració (veure apartat 4.1.3), podria succeir que, donat que no s'han considerat els costos de capital en les estimacions, s'infrastimés l'efecte rebot. Els nous aparells més eficients amplificarien l'efecte rebot si resulten menys costosos que els anteriors menys eficients. Caldria constatar si la resta d'aparells domèstics que utilitzen electricitat també han seguit aquesta tendència.

La dificultat en l'obtenció de determinades variables per la seva inclusió en les estimacions ha estat la causa de la seva no consideració en les anàlisis. Caldria introduir tots aquests aspectes de manera explícita en posteriors recerques, analitzant de manera més precisa com afecta cadascun en les estimacions de l'efecte rebot directe per aquesta via.

Adicionalment, aquestes estimacions es considerarien, sota les hipòtesis discutides, com un límit superior de l'efecte rebot, donat que com s'ha demostrat a l'apartat 3.3.4:

$$|\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_E}(E)|$$

D'altra banda, com s'ha indicat, no s'ha trobat cap estudi de característiques similars a Catalunya o a Espanya,⁸ però Fernández (2006) i Labandeira *et al.* (2010) van realitzar, estimacions de les elasticitats preu de la demanda residencial de l'electricitat a Espanya, sense estimar explícitament l'efecte rebot, trobant, la primera un valor de -0,51 i els segons, de -0,25 a curt termini, el que suposaria un efecte rebot del 51% o del 25% sota les hipòtesis mencionades.

⁸ Tot i que cal tenir en compte que hi ha dos estudis sobre l'efecte rebot a Espanya, no centrats en els usos energètics a les llars, que l'avaluen a partir de models d'equilibri general computable: Cardenete *et al.* (2008) i Guerra (2009).

Capítol 5

REVISIÓ DE LITERATURA EMPÍRICA SOBRE L'EFECTE REBOT INDIRECTE

Aquest capítol conté algunes qüestions preliminars bàsiques sobre l'efecte rebot indirecte per tal de contextualitzar-lo. S'analitzen les seves fonts, les causes i les principals implicacions que representa. També s'introdueixen alguns aspectes a tenir en compte a l'hora de realitzar estimacions.

Posteriorment es realitza una revisió de la literatura empírica tant de l'efecte rebot indirecte, economy-wide, com de l'anàlisi Input-output de l'energia, donada la metodologia utilitzada al llarg d'aquesta recerca per a obtenir una aproximació a l'efecte rebot indirecte a les llars a Catalunya.

5.1. Qüestions preliminars sobre l'efecte rebot indirecte

Com s'ha comentat al llarg de la recerca, quan es parla d'eficiència energètica, l'efecte rebot inclou tots aquells mecanismes que fan que les millores d'eficiència energètica no derivin en els estalvis d'energia que s'esperava que es produirien, o fins i tot que el consum final d'energia sigui major que el que hi havia abans de la millora d'eficiència. Això és degut a les respostes dels agents econòmics davant dels efectes de les millores produïdes.

Un increment de l'eficiència en la provisió d'un determinat servei energètic produeix una reducció del cost efectiu del mateix, que augmenta la renda disponible de l'agent econòmic que utilitzava el servei. El fet que es pugui aconseguir la mateixa quantitat de treball útil utilitzant una menor quantitat d'energia i, per tant, una menor despesa energètica, allibera una quantitat de recursos econòmics que es poden utilitzar incrementant l'ús del mateix servei energètic (efecte rebot directe) o consumint altres béns i serveis que també utilitzen energia, tant en el seu ús com a bé de consum final, com a l'hora de portar a terme la seva producció (efecte rebot indirecte).

La manera més adequada d'abordar l'efecte rebot indirecte des d'una perspectiva empírica no està clarament definida a la literatura, ja que, de la mateixa manera que succeeix amb l'efecte rebot directe, no ha estat una temàtica gaire desenvolupada, havent-hi diferents visions i metodologies d'avaluació. Pel cas de l'efecte rebot indirecte es disposa de menys evidència empírica que pel cas de l'efecte rebot directe, el que genera encara més incerteses entorn dels mètodes més adequats d'estimació.

Darrere del debat, tant de l'efecte rebot indirecte com dels efectes sobre tota l'economia, hi ha la inexistència d'un consens sobre el marc teòric més adequat per a descriure els mecanismes i conseqüències de l'efecte rebot a nivell macroeconòmic (Dimitropoulos, 2007). De fet, existeixen diversos models construïts sobre diferents marcs teòrics, com poden ser els models Post-Keynesians, els models Neoclàssics de creixement econòmic, els models d'equilibri general computable i altres modelitzacions alternatives per a l'avaluació de polítiques que són utilitzats per a l'avaluació de l'efecte rebot (Barker *et al.*, 2007; Grepperud i Rasmussen, 2004; Saunders, 2008; Small i Van Dender, 2007; Sorrell, 2007; Sorrell *et al.*, 2009; Wei, 2006).

A continuació, la recerca se centra en el desenvolupament d'una metodologia, així com en l'avaluació empírica de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic, centrat en les millores d'eficiència de l'electricitat a les llars a Catalunya, per a poder obtenir una millor aproximació a l'efecte rebot. L'efecte rebot directe representa només una part de l'efecte rebot total derivat de les millores d'eficiència energètica, pel que l'estimació de l'efecte rebot indirecte proporciona una visió més àmplia de la magnitud dels efectes que podrien assolir determinades polítiques de millora d'eficiència energètica a les llars.

Tot i això, l'estimació dels efectes directes i indirectes estàtics tampoc proporcionen la totalitat de l'efecte rebot derivat d'una millora de l'eficiència energètica en un àmbit determinat. Per una banda, caldria veure que succeeix amb els efectes dinàmics, és a dir, com les millores de la productivitat de l'energia provocarien canvis en les estructures

econòmiques i afectarien el creixement econòmic, portant a un major increment del consum energètic. Per altra banda, caldria considerar addicionalment (o alternativament) la multitud de canvis, la major part d'ells irreversibles, dins d'un context de sistemes complexos adaptatius que evolucionen (Polimeni *et al.*, 2008), que afectarien les estructures econòmiques, socials, tecnològiques i culturals a diversos nivells i escales. Aquests últims han estat menys explorats i possiblement requeririen altres enfocaments, tant teòrics com aplicats.

A diferència d'altres treballs d'estimació de l'efecte rebot indirecte, aquest parteix de les estimacions de funcions de demanda d'electricitat a les llars, obtingudes en l'estimació de l'efecte rebot directe, per tal de mostrar els efectes indirectes que podria tenir una millora de l'eficiència energètica a les llars sobre tota l'estructura econòmica.

Es desenvolupa una metodologia per a realitzar estimacions de la suma de l'efecte directe més l'indirecte estàtics, és a dir considerant els efectes sobre altres sectors productius donada una estructura productiva, sense una modificació d'aquesta, i sense entre entrar en els efectes sobre tota l'economia (*economy-wide effects*), que implicaria modificacions en rendes, preus i quantitats al llarg de tota l'economia, portant a nous reequilibris.

Es pot considerar que l'efecte rebot indirecte prové essencialment de dues fonts (Sorrell, 2007):

1. Contingut energètic: l'energia requerida per a produir i instal·lar les mesures que milloren l'eficiència energètica. Aquest efecte succeeix abans que la millora d'eficiència energètica es produeixi. Donat que aquesta font d'efecte indirecte requereix una anàlisi específica per a cada mesura d'eficiència energètica, queda fora de l'abast d'aquest treball, de contingut més genèric, però s'hauria de considerar a l'hora d'avaluar l'efecte de mesures concretes que millorin l'eficiència energètica. Per a fer-ho es podria utilitzar una adaptació dels models Input-output de l'energia que es desenvolupen en el capítol 6.

2. Efectes secundaris: el consum indirecte d'energia derivat d'aquestes millores. Aquests són els efectes indirectes que es produeixen posteriorment a l'aplicació de la mesura. Part d'aquests seran objecte de les estimacions realitzades en capítols posteriors, per a Catalunya.

5.1.1. Contingut energètic: consum indirecte d'energia de les mesures de millora de l'eficiència energètica

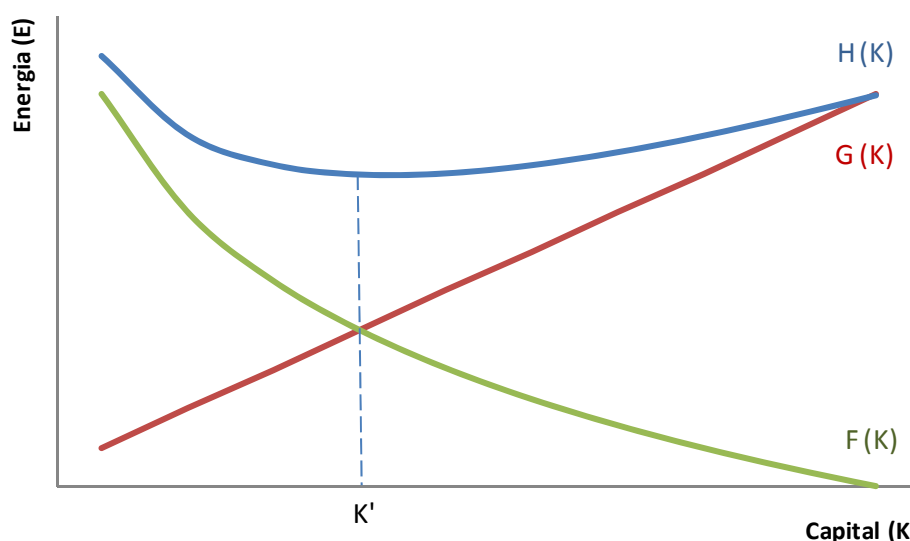
Aquesta font d'efecte rebot indirecte no s'estima quantitativament en aquesta recerca per la especificitat que suposa, tot i que els models desenvolupats permetrien avaluar el contingut energètic de mesures concretes d'eficiència energètica.

Aquest consum es realitza abans de que la millora d'eficiència energètica es produeixi. Moltes de les millores de l'eficiència energètica poden ser enteses com la substitució d'energia per capital, dins dels límits d'un sistema en particular. Per exemple, l'electricitat o el gas natural poden ser substituïts per un aïllament tèrmic (capital) per a mantenir la temperatura interna d'un edifici.

No obstant, les estimacions d'estalvi energètic no solen considerar el consum d'energia que es requereix per a produir i mantenir el capital substituït en qüestió. Aquest consum indirecte d'energia sovint és referit com a *embodied energy* (contingut energètic). Per exemple, l'energia necessària per a produir i instal·lar materials d'aïllament o motors més eficients.

El fet de substituir energia per capital produeix canvis en l'ús de l'energia en tota l'economia a través de canvis en les demandes intermèdies de béns i serveis. La demanda d'energia, per tant, es veu incrementada com a conseqüència de la nova demanda de capital. Com a resultat, l'ús d'energia pot augmentar en altres sectors de l'economia (Kaufmann i Azary-Lee, 1990).

Gràfic 14. La substitució d'energia per capital i l'impacte en el consum d'energia associat



Font: Adaptació de Stern (1997).

El Gràfic 14 és una representació gràfica d'aquest procés. La funció $F(K)$ representa les diferents combinacions de capital i energia per a un nivell determinat d'output d'una empresa o sector, és a dir, la hipotètica substituïbilitat entre capital i energia. La funció $G(K)$ representa l'increment de costos energètics que suposa el consum indirecte d'energia, sobre altres sectors o agents econòmics, associat al nou nivell de capital. La funció $H(K)$ representa la suma de les dues anteriors, i mostra com hi ha una reducció del consum d'energia fins a arribar a un determinat nivell de capital (K'), a partir del qual l'ús de l'energia directe més indirecte augmenta, ja que el consum indirecte d'energia excedeix els estalvis directes.

Alguns autors, com Webb i Pearce (1975), deixen entreveure que aquesta font no hauria de suposar *backfire*, ja que el cost d'una tecnologia energèticament eficient ja hauria de reflectir, entre altres, el cost de l'energia continguda, pel que si aquest darrer cost excedeix els estalvis en els costos energètics, la nova mesura no resulta cost-efectiva. Aquest argument no considera el consum energètic en termes de contingut calorífic, sinó en termes de valoració monetària de les diverses opcions energètiques.

Cal tenir en compte, però, que donat que, en absència d'externalitats, els preus haurien de reflectir tots els costos, les noves mesures podrien resultar cost-efectives amb un major consum energètic però un menor cost global, per un menor cost d'altres béns i serveis intermedis per a portar a terme la seva producció.

5.1.2. Efectes secundaris: el consum indirecte d'energia per canvis en els patrons de consum

Aquesta tipologia d'efecte rebot indirecte succeeix un cop s'ha produït la millora d'eficiència energètica. Per aquesta via, les millores en la productivitat energètica suposarien una reducció del cost de la factura energètica a les llars i/o les empreses (en funció de l'àmbit en què es produís la millora), el que portaria a canvis en la demanda final del propi servei energètic objecte de la millora (efecte rebot directe), però també produiria canvis en les demandes d'altres béns i serveis, que necessiten energia en el seu procés productiu. És a dir, modificaria els patrons de consum d'empreses i llars, implicant canvis en l'ús de l'energia.

Una millora de l'eficiència augmentaria la renda disponible de les famílies, el que provocaria, en el cas que la millora d'eficiència energètica s'assimilés a una reducció del cost energètic, a una expansió del consum i/o la inversió (també a través de l'estalvi) en béns i serveis, els quals també requereixen energia per a ser produïts, subministrats i consumits.

En el cas que la millora es produís en l'àmbit d'una empresa (o sector econòmic), aquesta veuria reduïts els seus costos de producció, el que, en condicions de competència perfecta, traslladaria a una reducció de preus del bé o servei, reduint alhora els preus de tots els béns i serveis que utilitzen el producte com a input productiu i, per tant, creant pressions deflacionistes en l'economia. Això provocaria un increment de la renda real i

una expansió del consum final que acabaria repercutint en el creixement de l'economia i incrementant el consum d'energia.

Considerant un cas de competència imperfecta, en les seves diverses modalitats, les millores d'eficiència energètica no es traslladarien, o només ho farien parcialment, a una reducció dels preus, però podrien tenir efectes sobre altres vectors com ara majors salaris, beneficis, impostos, etc., el que també incrementaria la renda real disponible agregada, incrementant la demanda i l'estalvi finals i estimulant el creixement econòmic.

Els efectes també es traslladarien, a través del comerç, els moviments de capital i les relacions internacionals cap a altres regions i països, i cap a altres períodes temporals a través del sistema financer. Tots aquests processos acabarien generant, de manera indirecta, majors necessitats energètiques del propi sistema a causa de la millora de la productivitat de l'energia.

L'observació de l'impacte net de tot aquest procés implica certa dificultat metodològica, pel fet que suposa l'adopció d'una perspectiva general on resulten afectats multitud d'empreses i agents econòmics que estan interrelacionats, així com les pròpies incerteses inherents al comportament social.

5.2. Revisió de la literatura empírica

Com s'ha mostrat al capítol introductori, la literatura empírica existent sobre efecte rebot indirecte, sovint barrejat amb els efectes sobre tota l'economia, es basa principalment en quatre grans tipologies d'estudis (Sorrell, 2007):

1. Estudis d'elasticitats de substitució.
2. Estudis de Modelatge Macroeconomètric.
3. Estudis de Modelatge d'Equilibri General Computable (MEGC).

4. Estudis d'energia, productivitat i creixement econòmic.

En aquest apartat es realitzarà una revisió de la literatura empírica sobre l'efecte rebot avaluat des d'una perspectiva d'equilibri general, considerant els efectes sobre tota l'economia derivat de models d'equilibri general computable i l'anàlisi Input-output generalitzat ambiental. La metodologia i els models desenvolupats en aquesta recerca se situarien entre els punts 3 i 4 de l'anterior classificació, ja que malgrat representar una modelització d'equilibri general, presenten característiques pròpies, com el fet d'estar construïts en termes d'unitats físiques d'energia.

La literatura empírica sobre efecte rebot indirecte és força escassa, en comparació amb l'existent sobre efecte rebot directe. En molts casos hi ha certa barreja i confusió entre l'efecte rebot indirecte i els efectes sobre tota l'economia (*economy-wide effects*).

5.2.1. Efectes sobre tota l'economia: *economy-wide effects*

Per a l'estimació de l'efecte rebot des d'una perspectiva macroeconòmica, a la literatura es troben principalment metodologies de modelatge d'equilibri general computable (MEGC) i de modelatge macroeconòmic, aquestes últimes basades principalment en el desenvolupament empíric de models neoclàssics de creixement econòmic i derivacions.

Malgrat l'escassetat de treballs que hi ha en la literatura empírica de les dues tipologies d'estudis, la Taula 13 mostra alguns dels estudis d'estimació de l'efecte rebot realitzats fins l'actualitat a partir de models d'equilibri general computable. S'han resumit en una taula ja que l'interès del present treball se centra en els efectes indirectes i els seu estudi mitjançant l'anàlisi input-output de l'energia, que es desenvolupa en capítols posteriors.

Taula 13. Estudis d'estimacions de l'efecte rebot sobre tota l'economia a partir de modelització d'equilibri general computable i principals resultats

Autors	País objecte de les estimacions	Funció de producció	Elasticitat de substitució	Efecte rebot
Semboja (1994)	Kenya	Cobb-Douglass	1 o 0	170% – 350%
Dufournaud <i>et al.</i> (1994)	Sudan	CES	0,2 – 0,4	54% – 59%
Vikström (2004)	Suècia	CES	0,07 – 0,87	60%
Grepperud i Rasmussen (2004)	Noruega	CES	0 – 1	< 100%
Washida (2004)	Japó	CES	0,3 – 0,7	35% – 70%
Glomsrød i Taojunan (2005)	China	Cobb-Douglass, Leontief, CES	1	> 100%
Hanley <i>et al.</i> (2006)	Escòcia	CES	0,3	120%
Allan <i>et al.</i> (2006)	Regne Unit	CES	0,3	30% – 50%

Font: Elaboració pròpia a partir de Dimitropoulos (2007).

Addicionalment als MEGC bàsics, es troben els models macroeconòmics híbrids, que combinen models d'equilibri general computable amb tècniques economètriques avançades i models d'enginyeria “*bottom-up*”. Un d'aquests exemples són els models denominats “*Energy–Economy–Environment*” (E3) que combinen models economètrics amb models d'equilibri general i submodels energètics i d'impacte ambiental, com per exemple el model 4CMR utilitzat per Barker *et al.* (2007) per a estimar l'efecte rebot macroeconòmic del Regne Unit, o el model NEMO, utilitzat per Koopmans (1997) per a Holanda.

Dels treballs empírics sobre estudis sobre modelatge macroeconomètric, basats en models neoclàssics de creixement, destaquen els treballs de Jorgenson i els seus col·legues (Jorgenson i Fraumeni, 1981; Jorgenson, 1984; Hogan i Jorgenson, 1991).

5.2.2. Efectes indirectes: contingut energètic de les mesures i efectes secundaris

Hi ha pocs estudis que realitzin estimacions del contingut energètic de les tecnologies o mesures que porten a una millora de l'eficiència energètica (veure apartat 5.1.1) i aquests es troben principalment focalitzats en els usos domèstics. En un estudi de Kaufmann i Azary-Lee (1990) sobre l'efecte rebot a la indústria, van estimar que entre 1954 i 1984, el contingut energètic associat al capital que millorava l'eficiència energètica a la indústria nord-americana de productes forestals, compensava en un 83% els estalvis energètics directes produïts per aquest mateix equipament de capital.

D'aquesta manera, es poden obtenir estimacions del contingut energètic de diverses categories de béns i serveis a partir d'una anàlisi Input-output de l'energia, d'una anàlisi del cicle de vida (*life-cycle analysis* (LCA)) o d'una combinació d'ambdós (Chapman, 1974; Herendeen i Tanak, 1976; Kok *et al.*, 2006).

Casals (2006) mostra, a nivell de la Unió Europea, com ni en 100 anys de vida útil es pot recuperar el contingut energètic de les mesures, a partir dels estalvis energètics operacionals de les mesures aplicades als edificis de baix contingut energètic. Altres estudis similars són els de Feist (1996), Winther i Hestnes (1999) i la Royal Commission on Environmental Pollution (2007). Els dos primers, van trobar valors baixos, i amb temps de recuperació de les inversions, en termes energètics, menors a un any. El darrer, però, va estimar uns 15 anys de recuperació de la inversió en termes energètics, per als nous habitatges amb dissenys de baix consum energètic al Regne Unit.

D'altra banda, cal destacar l'estudi de Sartori i Hestnes (2007), en que van realitzar una revisió de literatura de 60 casos d'estudi de consum energètic en edificis, trobant que la proporció de contingut energètic en el consum d'energia realitzat en el cicle de vida respecte el total, era d'entre un 9% i un 46% pels edificis de baix consum energètic i d'entre un 2% i un 38% per a edificis convencionals.

En diversos estudis, l'evidència empírica de l'efecte rebot en el context macroeconòmic ha estat orientada cap a l'efecte renda produït per la introducció de tecnologies que milloren l'eficiència energètica en serveis energètics que es troben propers a la saturació. Aquest increment de la renda disponible estimula el consum i la demanda d'energia. Alguns autors han utilitzat aquesta interpretació (Jalas, 2002; Carlsson-Kanyama *et al.*, 2005; Cohen *et al.*, 2005; Takase *et al.*, 2005) trobant que les necessitats indirectes d'energia derivades de la millora d'eficiència energètica a les llars són majors que els estalvis directes que han produït aquelles mateixes millores.

Sobre aquests efectes secundaris de les millores d'eficiència energètica (tractat en l'apartat 5.1.2 del present capítol), contràriament al que mencionen els autors anteriors, diversos autors han afirmat que són baixos (Lovins *et al.*, 1988; Greening i Greene, 1998; Schipper i Grubb, 2000; Dimitropoulos, 2007), pel fet que el consum d'energia suposa una petita proporció de la despesa total de les llars, i que el contingut energètic de la resta de béns i serveis també és menor.

D'altra banda, pel que fa la gran majoria de béns i serveis, segons Greening i Greene (1998) les dades disponibles de les taules Input-output suggereixen que la despesa efectiva en energia seria menor del 15%. Els efectes indirectes resultarien també baixos.

Cal tenir en compte, però, que malgrat que el consum d'energia és una proporció menor dins els pressupostos de les empreses i les llars, en relació a altres despeses, les millores d'eficiència poden comportar canvis en els patrons de consum i altres efectes dinàmics, l'energia requerida dels quals pot resultar finalment major. A més, un canvi de patró de consum pot comportar altres estalvis monetaris, que acabarien suposant un increment en el consum d'energia (Alfredsson, 2004).

De la mateixa manera que succeeix amb l'efecte rebot indirecte abans que les noves tecnologies o mesures que han de millorar l'eficiència energètica entrin en funcionament (és a dir, el contingut energètic de les mesures que s'aplicaran), els efectes secundaris, un

cop introduïdes les millores, es poden calcular a partir de metodologies Input-output, mètodes d'anàlisi del cicle de vida o metodologies mixtes.

La combinació de taules Input-output en termes energètics amb dades sobre el consum de diferents categories de béns i serveis a les llars permet observar canvis en el consum directe i indirecte d'energia en tota l'economia al modificar els patrons consum final de les llars. Per tant, suposant una millora de l'eficiència energètica a les llars que produeix un canvi en aquests patrons es pot estimar l'efecte rebot directe i indirecte.

Un estudi que relaciona directament els canvis en els patrons de consum a les llars amb l'efecte rebot és el de Druckman *et al.* (2010). A partir d'un model Input-output quasi-multiregional per a l'economia del Regne Unit, simulen els efectes sobre les emissions de CO₂ de canvis en els patrons de consum de les llars deguts a determinades accions d'estalvi d'energia portades a terme de manera voluntària.⁹ Concretament van estimar l'efecte *re-spending* de realitzar aquestes accions. Van trobar un efecte rebot indirecte d'entre el 12% i el 512% en el pitjor dels casos, amb uns resultats esperats més probables del 34%, en funció dels sectors sobre els que es realitzava la nova despesa final.

5.2.3. L'anàlisi Input-output de l'energia

El mètode Input-output és una adaptació de la teoria neoclàssica de l'equilibri general per a l'estudi empíric de la interdependència entre activitats econòmiques interrelacionades (Leontief, 1936; Leontief, 1941; Leontief *et al.* 1953). Aquest va ser inicialment desenvolupat per Wassily Leontief i posteriorment ampliat per d'altres autors a molts camps amb molt diverses aplicacions.

⁹ Com per exemple, reduir 1°C la temperatura del termòstat, caminar o anar en bicicleta en comptes d'utilitzar l'automòbil o reduir la compra de menjar en un terç, eliminant residus alimentaris.

Des de finals dels anys 60 de segle XX, el marc d'anàlisi Input-output va començar a ser ampliat per part de molts investigadors per tal de relacionar el sistema econòmic i l'activitat interindustrial amb el medi ambient. El pioner d'aquest tipus d'estudis va ser Isard (1968), que va proposar una metodologia basada en l'anàlisi Input-output de Leontief relacionant variables econòmiques i ambientals que, alhora, ofería més alternatives de política econòmica. Posteriorment, el mateix Leontief (1970) va proporcionar una de les extensions metodològiques clau per a aquest tipus de desenvolupaments.

Els models Input-output generalitzats per a l'anàlisi dels fluxos ambientals s'han assentat de manera robusta en la literatura (Isard, 1968; Daly, 1968; Ayres i Kneese, 1969; Leontief, 1970; Leontief i Ford, 1971; Isard *et al.*, 1972; Victor, 1972).

Cap a finals dels anys 60 i principis dels 70 del segle XX va començar a créixer la preocupació per part de decisors polítics i comunitat acadèmica pels temes relacionats amb el paper i l'ús de l'energia en l'economia i els impactes ambientals associats. Concretament, els models Input-output de l'energia van ser àmpliament desenvolupats i utilitzats en el context de la crisi energètica que es va produir durant els anys 70. Recentment, s'ha produït un ressorgiment d'aquests models per a l'anàlisi de les relacions entre ús de l'energia a l'economia i canvi climàtic.

Al mateix temps que es desenvolupava el marc Input-output de l'energia, altres autors investigaven les mateixes qüestions des de la perspectiva de l'eficiència termodinàmica des de l'enginyeria i la química. Concretament, Berry *et al.* (1978) van estudiar les relacions entre eficiència econòmica i eficiència termodinàmica. L'anàlisi de les relacions entre les dues eficiències va portar al desenvolupament de la "teoria energètica del valor" (Hannon, 1973; Gilliland, 1975; Costanza i Herendeen, 1984), que proposa que el valor dels béns i serveis d'una economia està relacionat amb el seu contingut energètic directe i indirecte; i de la "teoria entròpica del valor" (Georgescu-Roegen, 1971), que a partir de la segona llei de la termodinàmica evidenciava els límits del creixement econòmic.

Alguns dels autors que van desenvolupar i utilitzar la metodologia Input-output aplicada a l'ús de l'energia van ser Cumberland (1966), Strout (1967), Ayres i Kneese (1969), Bullard i Herendeen (1975), Griffin (1976), Blair (1979), Casler i Wilbur (1984), Proops (1988), entre d'altres. Recentment, els desenvolupaments de l'anàlisi input-output i l'ús de l'energia s'han centrat en desenvolupar extensions del marc Input-output de Leontief.

Bullard i Herendeen (1975) van desenvolupar inicialment una de les extensions Input-output de l'energia més utilitzades. Aquest és el desenvolupament anomenat en "unitats híbrides", consistent en comptabilitzar l'energia afegint una sèrie de coeficients lineals que defineixen l'ús de l'energia per unitat monetària d'output dels diferents sectors econòmics compresos en les taules Input-output. Malgrat les seves limitacions pràctiques i metodològiques, aquest desenvolupament continua essent àmpliament utilitzat avui en dia, ja que és molt difícil obtenir totes les dades necessàries per a assegurar la consistència interna en la comptabilització de l'energia i el seu ús a través de l'economia (Miller i Blair, 2009). Una versió moderna d'aquest desenvolupament s'exposarà àmpliament en l'apartat 6.1.

El treball de Bullard i Herendeen (1975) va ser posteriorment desenvolupat per altres autors, sobretot durant les dècades dels 80 i els 90, per tal de caracteritzar els efectes d'un impost sobre l'energia (Herendeen, 1974), analitzar els costos i els beneficis dels programes d'estalvi d'energia (Henry, 1977), analitzar el balanç comercial d'energia entre regions (Bourque, 1981), els impactes de les noves tecnologies energètiques (Herendeen i Plant, 1981; Blair, 1979; Casler i Hannon, 1989), així com els canvis estructurals en les economies i les seves implicacions per al consum d'energia i per a les emissions atmosfèriques (Blair, 1980; Wang i Chuang, 1987; Blair i Wyckoff, 1989; Rose i Chen, 1991; Han i Lakshmanan, 1994; Casler, 2001; Dietzenbacher i Sage, 2006).

Des dels anys 90 del segle XX, les aplicacions de l'anàlisi Input-output a temes energètics han estat bàsicament dominades per tres àrees (Miller i Blair, 2009):

1. Anàlisis més detallades dels fluxos d'energia i materials en indústries complexes (Albino *et al.*, 2003; Giljum i Hubacek, 2004).
2. Anàlisi de les relacions entre l'ús de l'energia i les qüestions mediambientals en àrees com el canvi climàtic i el desenvolupament sostenible (Lenzen *et al.*, 2004; Kratena i Schleicher, 1999; Zhang i Folmer, 1998; Jorgeson i Stiroh, 2000).
3. Anàlisi dels canvis en l'estructura econòmica relacionats amb el canvi de patrons de l'ús de l'energia en les mateixes (Kagawa i Inamura, 2004).

L'anàlisi Input-output de l'energia (i d'ectors ambientals) ha estat també utilitzada per a l'estimació de la variació del consum total de recursos d'una economia davant de variacions en els patrons de consum final (Bezdek i Hannon, 1974; Hertwick, 2005; Takase *et al.*, 2005, entre d'altres). Això pot vincular-se a l'efecte rebot considerant que, quan un canvi en l'eficiència redueix la factura energètica, es produeix un augment de la despesa en la resta de béns i serveis, o alternativament, es produeix un major estalvi, el que porta a un increment de la inversió, i per tant un increment de la demanda final agregada de l'economia.¹⁰

La Taula 14 mostra un recull d'altres estudis centrats en l'anàlisi Input-output de l'energia per a l'estudi i avaluació de qüestions diverses, a part dels que s'han anat mencionant al llarg d'aquest apartat. Gran part d'aquests no estan vinculats de manera directa amb l'efecte rebot, tot i que tenen relació amb la discussió que es portarà a terme posteriorment, així com per a portar a terme els desenvolupaments metodològics i l'estimació de l'efecte rebot indirecte a Catalunya.

¹⁰ Aquestes argumentacions es desenvoluparan amb major precisió en l'apartat 6.2.

Taula 14. Alguns estudis empírics d'anàlisi Input-output de l'energia i qüestió analitzada.

Autor	País	Qüestió analitzada
Folk i Hannon (1973)	EUA	Relació energia-ocupació
Herendeen i Sebald (1973)	EUA	Ocupació i energia per les opcions dels consumidors
Chapman <i>et al.</i> (1974)	Regne Unit	Combustibles
Hannon i Puleo (1974)	EUA	Energia i ocupació per a opcions de transport
Wright (1974)	EUA	Consum de béns i serveis
Pick i Becker (1975)	EUA i Regne Unit	Política de materials i optimització de sistemes
Denton (1975)	Alemanya	Consum de béns i serveis
Wright (1975)	Regne Unit	Consum de béns i serveis
Pilati (1976)	EUA	Subministrament d'electricitat i opcions d'estalvi d'energia
Hannon <i>et al.</i> (1978)	EUA	Energia i ocupació a la construcció
Herendeen (1978)	Noruega	Consum a les llars
Al-Ali (1979)	Escòcia	Consum de béns i serveis
Penner <i>et al.</i> (1979)	EUA	Intensitats energètiques
Costanza (1980)	EUA	Teoria energètica del valor
Rogers (1980)	Canada	Anàlisi del cicle de vida d'un sistema de calefacció solar
Herendeen <i>et al.</i> (1981)	EUA	Consum a les llars
Proops (1984)	Diversos	Descomposició estructural i rati energia-output
James <i>et al.</i> (1986)	Austràlia	Impacte de les tecnologies energètiques
Gowdy i Miller (1987)	EUA	Descomposició estructural
Chen i Rose (1990)	Taiwan	Descomposició estructural
Peet (1993)	Nova Zelanda	Intensitats energètiques
Weber i Fahl (1993)	Alemanya	Consum a les llars
Chen i Wu (1994)	Taiwan	Electricitat
Lin i Polenske (1995)	Xina	Descomposició estructural
Nishimura <i>et al.</i> (1996)	Japó	Contingut material
Wier (1998)	Dinamarca	Descomposició estructural
Weber i Perrels (2000)	Diversos	Impactes de l'estil de vida
Alcántara i Padilla (2003)	Espanya	Sectors clau consum d'energia
Reinders <i>et al.</i> (2003)	11 Estats de la UE	Consum a les llars
Pachauri (2004)	Índia	Consum a les llars
Cohen <i>et al.</i> (2005)	Brasil	Consum a les llars

Font: Elaboració pròpia a partir de CSIRO (2005) i Kok *et al.* (2006).

Capítol 6

ASPECTES TEÒRICS I METODOLÒGICS PER A L'ESTIMACIÓ DE L'EFECTE REBOT INDIRECTE

Els efectes finals que produeix una millora de l'eficiència energètica són molt complexos i difícils de quantificar en la seva totalitat, ja que es difonen per tot el sistema econòmic i social de diverses maneres. Les millores d'eficiència energètica porten a una sèrie d'ajustaments en preus i quantitats dels béns i serveis produïts per una economia que l'acaben afectant en la seva totalitat.

Així, per exemple, una millora en l'eficiència energètica en la producció d'acer portarà a una reducció del seu cost final, el que incrementarà la seva demanda. Els consumidors finals es veurien afectats, ja que aquesta millora podria acabar incrementant l'ús dels vehicles privats en detriment d'altres formes de transport i per tant, incrementar el consum de gasolina. A més, a llarg termini aquests efectes produirien canvis en els costums socials i altres aspectes culturals, així com canvis irreversibles que no es poden quantificar empíricament en la seva totalitat.

D'altra banda, com es mostrarà en aquest i en posteriors capítols, es poden delimitar àmbits d'anàlisi i, sota certes hipòtesis, obtenir aproximacions de l'efecte rebot directe i indirecte que permetin indagar en major o menor mesura en els seus mecanismes de funcionament. També es pot evidenciar la importància que pot arribar a tenir, amb l'objectiu que sigui correctament considerat a l'hora de dissenyar i implementar polítiques públiques.

Com s'ha mostrat en el capítol anterior, l'efecte rebot indirecte deriva de dues fonts (Sorrell, 2007): l'energia requerida per a produir i instal·lar les tecnologies o mesures que milloren l'eficiència energètica, i el consum d'energia indirecte provocat per les millores d'eficiència. Aquests últims són els efectes indirectes que es produeixen posteriorment a l'aplicació de la mesura.

La primera tipologia d'efectes indirectes és específic per a cada mesura i s'hauria

d'incorporar en l'avaluació de mesures concretes de millora de l'eficiència energètica, mentre que la segona tipologia d'efectes tenen una validesa universal per a qualsevol tipus de tecnologia o mesura.

Part de la present recerca se centrarà en el desenvolupament metodològic i empíric de la segona tipologia d'efectes indirectes, és a dir, en el consum d'energia causat per el funcionament de les noves tecnologies que milloren l'eficiència energètica. Una segona delimitació de l'àmbit d'estudi és que només s'han considerat els efectes estàtics, és a dir, l'estructura econòmica en consideració no varia després de la millora d'eficiència.

En aquest capítol es desenvolupen els aspectes teòrics i metodològics de l'anàlisi Input-output de l'energia i de la modelització *re-spending*, que serviran de base per a posterior estimació de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics de les millores d'eficiència energètica a les llars a Catalunya del capítol 7.

6.1. Modelització Input-output de l'energia

Els models Input-output de l'energia es basen, en primer terme, en el model desenvolupat en el treball pioner de Leontief (1941), que proporciona un mètode d'avaluació parcial, però des d'una perspectiva macroeconòmica, dels impactes sobre els diversos sectors productius produïts per variacions en la demanda final d'una economia.

A partir de dades estadístiques econòmiques, com les que es poden trobar als sistemes de comptabilitat nacional, aquests models d'anàlisi econòmica aplicada permeten la simulació de determinades polítiques i l'anàlisi de les seves repercussions.

Les bases teòriques es troben en el model Arrow-Debreu (Arrow i Debreu, 1954) i en la noció d'equilibri Walrasià (Walras, 1954).

6.1.1. El mètode Input-output per a l'anàlisi de les relacions intersectorials

El mètode d'anàlisi Input-output és una adaptació de la teoria neoclàssica de l'equilibri general, desenvolupada inicialment per Walras a finals del segle XIX, aplicada a l'estudi empíric de la interdependència quantitativa entre activitats econòmiques. El suport estadístic d'aquests models són les taules Input-output.

Aquesta tècnica d'anàlisi va ser desenvolupada per Wassily Leontief (1905-1999), que l'any 1973 va obtenir el premi Nobel d'Economia per haver-les ideat i desenvolupat. Les primeres taules Input-output van ser presentades l'any 1941 (Leontief, 1941) amb la publicació de la seva obra: *The Structure of the American Economy*.

El model Input-output de Leontief (Leontief, 1936; 1941; Leontief *et al.*, 1953) és una representació abstracta de la tecnologia que utilitzen els sectors productius d'una economia, i especifica els requisits de béns i factors necessaris per a produir cada bé. Està basat en les relacions d'interdependència econòmica general existents entre totes les activitats d'una estructura econòmica. El model configura les relacions entre les magnituds econòmiques implicades i, per tant, proporciona una via d'anàlisi dels possibles efectes econòmics de canvis de determinades magnituds, considerades exògenes al model, sobre les restants variables econòmiques endògenes.

6.1.1.1. La base estadística: les taules Input-output

Les taules Input-output són una peça bàsica en la construcció dels Sistemes de Comptabilitat Nacional (SCN), tal i com reconeixen els manuals de Nacions Unides de Comptes Nacionals (SNA-93) i el Sistema Europeu de Comptes Nacionals i Regionals 1995

(SEC-95).¹¹

Les taules permeten aproximar les principals macromagnituds que defineixen una economia, com el Producte Interior Brut (PIB), el Valor Afegit Brut (VAB), les rendes generades (salari i excedent brut d'explotació) i els diversos conceptes que constitueixen la demanda agregada de l'economia: consum privat, consum públic, inversió i demanda exterior. En les taules s'estimen totes aquestes magnituds establint un equilibri entre els recursos totals dels quals disposa l'economia i els usos que en fa dels mateixos. El tancament comptable que comporta aquest equilibri dota de coherència a les estimacions.

La taula és una matriu de doble entrada de les relacions econòmiques d'una regió econòmica durant un període de temps determinat, generalment un any.

Gràfic 15. Esquema d'una taula Input-output simètrica

	Productes (o sectors productius)	Resta del món	Despesa en consum final	Formació Bruta de Capital	TOTAL
Productes (o sectors productius)	Consums intermedis	Exportacions	Despesa en consum final	Formació Bruta de Capital	Usos totals per producte
Components del Valor Afegit	Valor Afegit Brut				
Producció	Producció				
Resta del món	Importacions				
TOTAL	Oferta total per producte				

Font: elaboració pròpia.

¹¹ Aprovat mitjançant Reglament (CE) núm. 2223/96 del Consell de 25 de juny del 1996.

6.1.1.2. *Model simplificat de demanda de Leontief*¹²

A continuació s'exposa matemàticament el model simplificat de demanda de Leontief, així com els diversos supòsits implícits que incorpora. Aquesta és la versió més simple i, per tant, la que incorpora més hipòtesis i està més allunyada de la realitat.

Les principals hipòtesis de partida són les que es mostren a continuació:

- Cada branca productiva (o sector) produeix un sol producte.
- Hi ha el mateix nombre de branques subministradores que productes que utilitzadores dels mateixos. Ha d'existir una correspondència entre el nombre total de productes empleats en els processos de producció i el nombre de sectors que els elaboren.
- Els coeficients tècnics són constants. Un coeficient tècnic és la quantitat necessària d'un bé, expressada en unitats monetàries, per a produir una unitat d'un altre bé, dins d'un procés de producció. Aquests es definiran matemàticament més endavant.
- Hi ha exogeneïtat en les alteracions de la demanda final o del valor afegit brut (VAB). Aquest supòsit implica que tant la demanda final (que és la que no es correspon a les demandes intermèdies entre sectors), com els VAB de cada branca no són explicades dins del model sinó que són considerades com variables exògenes. Una alteració d'aquestes variables permet obtenir una mesura de impacte econòmic o altres indicadors.

¹² Per a un major aprofundiment en l'anàlisi Input-output i en el model de Leontief, veure Miller i Blair (2009) i Pulido (1993), entre d'altres.

La notació que s'utilitzarà és la següent:

X_{ij} = Flux del sector i (subministrador) al sector j (utilitzador).

$$X_i = \text{Producció total del sector } i.$$

y_i = Demanda final del sector i .

$i, j = 1, 2, \dots, n$, sent n el número de sectors considerats.

La taula Input-output en les seves relacions per files pot expressar-se com:

[illegible]

Aquest sistema d'equacions mostra com la producció total d'un sector es pot representar matemàticament com la suma de les demandes intermèdies que li realitzen la resta de sectors, més la seva pròpia demanda final, que de manera simplificada, correspon principalment al consum de les llars, la despesa pública, les inversions i les exportacions.

En forma matricial desenvolupada, també es pot expressar com:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

Que es pot resumir en la notació:

$$x = Xi + y \quad (33)$$

on X és el vector columna de producció dels sectors econòmics; X és la matriu de transaccions interindustrials; i és el vector columna d' n elements unitaris i y representa el vector columna de demanda final sectorial.

De manera anàloga a l'expressió (31), i considerant g_i com el valor afegit del sector i , les relacions en columnes es poden expressar per a qualsevol sector j com:

$$X_j = x_{1j} + x_{2j} + \dots + x_{nj} + g_j \quad (34)$$

El que significa que la producció de cada sector també és igual a la suma de les demandes intermèdies que aquest realitza a la resta de sectors (és a dir, als seus inputs productius), més el seu valor afegit, el qual, de manera simplificada, estaria integrat pels salaris, els excedents d'explotació i els impostos.

En termes matricials, i anàlogament a l'expressió (32):

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_n \end{bmatrix} \quad (35)$$

és a dir:

$$x' = i'X + g' \quad (36)$$

Per últim, cal considerar com, la igualtat entre la suma de les demandes finals sectorials i la suma dels valors afegits, representen dues formes alternatives de càlcul del Producte Interior Brut (PIB):

$$y_1 + y_2 + \dots + y_n = g_1 + g_2 + \dots + g_n \quad (37)$$

o en notació matricial:

$$i'y = i'g \quad (38)$$

A partir d'aquestes relacions generals, el model simplificat de Leontief inclou la hipòtesi simplificadora que la producció de cada sector necessita unes quantitats fixes tant de productes intermedis subministrats per altres sectors com d'inputs primaris.

Per tant, les proporcions d'inputs inicialment utilitzades per part dels sectors és invariable. D'aquesta manera, es poden definir uns coeficients tècnics per als productes intermedis:

$$a_{ij} = \chi_{ij} / \chi_i \quad (39)$$

El model representat a l'expressió (31), que correspon a les relacions intersectorials analitzades per files, ara es pot expressar com a:

[illegible]

O en termes matricials:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (41)$$

És a dir:

$$x = Ax + y \quad (42)$$

o bé, sent I la matriu unitària:

$$x = (I - A)^{-1} y \quad (43)$$

La matriu $(I - A)^{-1}$ és la denominada “matriu inversa de Leontief”. La solució que presenta l'equació (43) és la nova producció que assoleixen els diferents sectors productius davant d'una nova demanda final y .

A partir de l'expressió (43) i denominant els elements de la matriu inversa de Leontief α_{ij} , la producció d'un sector i es pot calcular com:

$$x_i = \alpha_{i1}y_1 + \alpha_{i2}y_2 + \dots + \alpha_{in}y_n \quad (44)$$

Els elements α_{ij} indiquen, per tant, la quantitat addicional produïda pel sector i si la demanda final del sector j s'incrementa en una unitat, és a dir recollirà els efectes directes més els indirectes d'un increment en la demanda d'un sector.

Aleshores, els elements α_{ij} seran majors que la unitat, donat que recolliran l'efecte directe de l'increment en la demanda sobre la producció del seu propi sector més els efectes induïts sobre d'altres sectors per necessitats addicionals de portar a terme la seva producció.

L'efecte final d'un increment d'una unitat en la demanda final del sector j (Δy_j) sobre tots els sectors vindrà donat per la suma dels elements de la columna j -èsima de la matriu Inversa de Leontief i es denomina multiplicador de la producció del sector. També és conegut com “coeficient d'arrossegament”, mesurant els denominats encadenaments cap endarrere (*backward linkages*):

$$O_j = \sum_i \alpha_{ij} \quad (45)$$

Aquest indicador representa la capacitat directa i indirecta de repercussió d'un xoc produït a la demanda final d'un sector, sobre la resta de l'economia i té un valor major o igual a la unitat.

D'altra banda, es pot mesurar l'efecte sobre la producció d'un sector econòmic i després d'un increment unitari de la demanda final en tots els sectors. Aquests són coneguts com a “coeficients d'impuls” i mesuren els encadenaments cap endavant (*forward linkages*):

$$O_i^* = \sum_j \alpha_{ij} \quad (46)$$

6.1.2. L'anàlisi Input-output del consum d'energia i la determinació dels sectors clau en el consum d'energia

En aquest apartat es desenvolupa un model Input-output del consum d'energia a partir del model que Proops (1988) va desenvolupar per a l'energia i Alcántara (1995) i Alcántara i Roca (1995) per als contaminants atmosfèrics. Aquest model mostra diversos aspectes de les relacions entre l'entorn productiu i el medi natural.

S'ha desenvolupat un model senzill que evidencia les relacions estructurals entre l'activitat productiva i el consum d'energia, mitjançant la vinculació d'una matriu de consums sectorials d'energia amb una taula Input-output. Posteriorment s'utilitzarà per a relacionar el consum d'energia de les activitats econòmiques a Catalunya amb la matriu Input-output de l'economia catalana i derivar-ne l'efecte rebot corresponent.

A partir del marc d'anàlisi Input-output exposat en l'apartat anterior i una matriu de consums energètics sectorials es poden establir vectors d'intensitats energètiques per a una economia, en termes d'unitats d'energia en relació a les unitats monetàries. De manera genèrica es pot expressar:

$$E = \frac{e}{x} \quad (47)$$

on e és el vector de consum total d'energia de les diferents fonts energètiques, i x és el vector de produccions sectorials.

$$E = (E_{gj})_{m \times n} \quad \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, n \\ g = 1, 2, \dots, m \end{matrix} \quad (48)$$

Cada element E_{gj} expressa el consum d'energia de les diverses fonts energètiques del

tipus g , en termes físics, per unitat d'output, en termes monetaris, del sector j .

Per tant, de l'expressió (47) es deriva que la matriu E representa un conjunt de coeficients econòmico-ambientals, tals que compleixen la següent relació:

$$Ex = e \quad (49)$$

Substituint x per l'expressió (43) del model de Leontief desenvolupat en l'apartat anterior, s'obté la següent expressió:

$$e = E(I - A)^{-1}y \quad (50)$$

On A és la matriu de coeficients tècnics, l'expressió $(I - A)^{-1}$ és la matriu inversa de Leontief i y representa el vector de demanda final sectorial.

Aïllant la següent matriu de l'expressió anterior, que anomenarem F :

$$F = E(I - A)^{-1} \quad (51)$$

S'obté un operador lineal que transforma un increment de la demanda final en un increment del vector de consums energètics.

En analogia als indicadors α_{ij} obtinguts en el desenvolupament del model de demanda de Leontief, cada element d'aquesta matriu F_{ij} representa la quantitat d'energia addicional consumida pel sector i quan la demanda final del sector j s'incrementa en una unitat, recollint tant els efectes directes com els indirectes, i per tant, mostrant el potencial d'arrossegament del sector j en el consum d'energia.

De la mateixa manera que en el model de demanda de Leontief, l'efecte final en el consum d'energia sobre tots els sectors d'un increment d'una unitat en la demanda final del sector j vindrà donat per la suma dels elements de la columna j -èssima de la matriu Inversa de Leontief premultiplicada per la matriu de coeficients d'intensitats energètiques.

Aquests es poden anomenar “coeficients d'arrossegament en termes d'energia” i, en analogia als del model productiu de Leontief, mesuren els denominats encadenaments cap endarrere (*backward linkages*):

$$F_{gj} = \sum_i E_{gi} \alpha_{ij} \quad (52)$$

D'altra banda, tenint en compte que en model de demanda de Leontief $\sum_j \alpha_{ij}$ és l'increment de la producció del sector i per a poder satisfer un increment unitari de la demanda final de tots els sectors econòmics, com mostra l'equació (46), es pot establir anàlogament la següent expressió:

$$F_{gi}^* = E_{gi} \sum_j \alpha_{ij} \quad (53)$$

Aquesta expressió representa l'energia consumida de la font g , pel sector i davant d'un increment unitari de la demanda final de tots els sectors. Es pot denominar aquest indicador com “coeficient d'impuls en termes d'energia”, mesurant la pressió que el sistema productiu exerceix sobre un sector determinat en termes ambientals (*forward linkages*).

Un aspecte interessant per a l'estimació de l'efecte rebot indirecte és la determinació dels

sectors clau en el consum d'energia en l'economia (Alcántara i Padilla, 2003). Aquests serien els sectors que tenen una major capacitat d'arrossegament o d'impuls en relació a la resta, davant d'un increment de la seva demanda final. Els coeficients de Rasmussen (Rasmussen, 1956) per a la determinació dels sectors clau en una economia han estat àmpliament utilitzats, tot i que en menor mesura per a temàtiques mediambientals (Pajuelo, 1980; Alcántara, 1995 i Alcántara i Padilla, 2003).

Partint dels resultats anteriors obtinguts, F_{gj} representa el total d'energia g consumida de tot el sistema econòmic per a l'obtenció d'una unitat de demanda final del sector j . D'altra banda, F_{gi}^* expressa el consum d'energia g del sector i quan es produeix un increment uniforme de la demanda final de tots els sectors productius. A partir d'aquests conceptes es poden obtenir les mitjanes que mostren les expressions (54) i (55).

$$\frac{1}{n} F_{gj} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (54)$$

Aquesta pot interpretar-se com una estimació del consum total de l'energia g (directe i indirecte) que un sector, escollit a l'atzar, generaria si la demanda final del sector j experimentés un increment.

D'altra banda:

$$\frac{1}{n} F_{gi}^* \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (55)$$

Que pot interpretar-se com una estimació de l'increment mitjà del consum d'energia per part per part del sector i , que genera l'increment de la demanda final d'un altre sector.

Per tal d'establir les relacions interindustrials, a continuació es normalitzen les mitjanes

obtingudes en relació a la mitjana total:

$$\frac{1}{n^2} \sum_j F_{gj} = \frac{1}{n^2} \sum_i F_{gi}^* \quad (56)$$

A continuació es pot construir una nova expressió:

$$\mu_j = \frac{\frac{1}{n} F_{gj}}{\frac{1}{n^2} \sum_j F_{gj}} \quad (57)$$

L'expressió (57) representa el coeficient d'arrossegament relatiu al consum d'energia g , és a dir, mostra el pes que el sector j té dins la totalitat del sistema econòmic en termes de consum d'una determinada font energètica.

D'altra banda, per a l'altra mitjana obtinguda també es pot desenvolupar un indicador anàleg, com es mostra a continuació:

$$\lambda_i = \frac{\frac{1}{n} F_{gi}^*}{\frac{1}{n^2} \sum_i F_{gi}^*} \quad (58)$$

L'expressió (58) és el coeficient d'impuls relatiu al consum de la font d'energia g . Expressa l'impacte relatiu que tindrà un increment unitari de la demanda final de tots els sectors econòmics sobre el consum d'energia del sector i .

A partir d'aquests dos indicadors es pot establir una classificació de la importància relativa en el consum d'energia dels diferents sectors d'una economia, atenent tant a la seva

capacitat de consum relatiu directe, com a proveïdor d'inputs, com al seu poder d'arrossegament en el consum d'energia, com a demandant d'inputs.

Així, que si $\mu_j > 1$, la indústria j té un pes relatiu major que la mitjana dels sectors en el consum total (directe i indirecte) d'energia que realitza tota l'economia. D'altra banda, si $\lambda_i > 1$, davant d'un increment uniforme de la demanda final de tots els sectors de l'economia, el sector i incrementarà el seu consum d'energia en major mesura que la mitjana. Per als sectors que es trobin en els casos: $\mu_j < 1$ i $\lambda_i < 1$ succeeix el cas contrari.

A partir d'aquestes consideracions es pot establir una classificació dels sectors econòmics, establint la seva importància relativa en el consum total d'energia (Taula 15).

Taula 15. Classificació dels sectors econòmics segons la importància en el consum d'energia, atenent els coeficients de Rasmussen

	$\mu_j > 1$	$\mu_j < 1$
$\lambda_i > 1$	Sectors clau	Sectors significatius des de la perspectiva de la seva demanda final
$\lambda_i < 1$	Sectors rellevants per la demanda d'altres sectors	Sectors poc rellevants

Font: Elaboració pròpia a partir d'Alcántara (1995) i d'Alcántara i Padilla (2003).

Com s'observa a la Taula 15, es poden classificar els sectors econòmics en quatre categories diferents atenent la seva importància dins el sistema en el consum d'energia que realitza tota l'economia.

Com es veurà en l'apartat 6.2, la determinació dels sectors clau en el consum d'energia pot resultar rellevant a l'hora de valorar el potencial de l'efecte rebot indirecte. Aquest resultarà menor o major en funció de cap a quins sectors econòmics es destini la nova demanda derivada de la renda monetària alliberada per la millora d'eficiència energètica produïda a les llars.

6.2. Modelització *re-spending*

6.2.1. Efectes de les millores d'eficiència sobre els patrons de consum final de les llars i mètodes d'estimació

A nivell teòric es pot argumentar que una millora de l'eficiència energètica a les llars produiria, *ceteris-paribus*, una modificació en els patrons de consum de les llars. Una reducció del cost dels serveis energètics a causa de la millora d'eficiència incrementaria la demanda del propi servei energètic, com s'ha argumentat àmpliament, però també incrementaria la demanda d'aquells béns i serveis considerats complementaris, és a dir, aquells que tenen una elasticitat creuada de la demanda menor que zero ($\eta_c(S) < 0$).

D'altra banda es produiria una reducció de la demanda d'aquells béns i serveis que són considerats substitutius, és a dir, aquells que tenen una elasticitat creuada de la demanda major que zero ($\eta_c(S) > 0$).

En un desenvolupament anàleg al de l'apartat 3.3, i mantenint les hipòtesis de simetria i exogeneïtat explicades en el mateix, es podrien considerar les elasticitats creuades entre el preu de l'energia i la demanda dels béns i serveis d'una economia, per a determinar empíricament com variarien aquestes demandes davant d'una millora de l'eficiència energètica en un àmbit concret.

Alternativament, un cop coneguda la renda alliberada per la menor despesa monetària en

energia (per la millora d'eficiència), es poden estimar les diferents elasticitats renda dels béns i serveis, per tal d'observar com es modificaria la demanda final de les llars davant d'aquest increment de la renda disponible.

A partir de mètodes econòmètrics es poden estimar tant les elasticitats creuades de la demanda dels béns i serveis d'una economia respecte el preu dels serveis energètics, com les elasticitats renda dels mateixos.

Això es pot fer de diverses maneres. Una de les vies utilitzades a la literatura és a partir de l'especificació de diversos models uniequacionals de la demanda dels béns i serveis, que incorporen el cost del servei energètic que ha millorat l'eficiència (o bé el preu de l'energia, sota les hipòtesis de simetria i exogeneïtat, mencionades al capítol 3 d'aquesta tesi), i la renda.

De manera genèrica, la demanda d'un bé podria expressar-se com:

$$x_i = f(p_i, p_s, p_{j...n}, y, z_i) \quad (59)$$

on x_i és la quantitat demandada d'un bé o servei, p_i és el preu del bé o servei, p_s és el cost del servei energètic o de l'energia, $p_{j...n}$ és el preu de la resta de béns i serveis de l'economia, y és la renda de les llars i z_i són altres factors específics que afecten la demanda del bé i .

Una via més complerta que l'anterior, per la consideració de més factors que afecten la demanda i estan interrelacionats, és realitzar l'especificació i estimació simultània d'un model multiequacional de les mateixes característiques.¹³

¹³ Els resultats proporcionats pels mètodes d'estimació de sistemes d'equacions proporcionen estimadors més robustos que els mètodes tradicionals d'estimació de funcions uniequacionals.

$$\begin{aligned}x_i &= f(p_i, p_s, p_{j...n}, y, z_i) \\x_k &= f(p_k, p_s, p_{j...n}, y, z_k) \\\vdots \\x_m &= f(p_m, p_s, p_{j...n}, y, z_m)\end{aligned}\tag{60}$$

En un context d'estimació conjunta de sistemes d'equacions prenen especial rellevància els AIDS (*Almost Ideal Demand System*) (Deaton i Muellbauer, 1980), traduïts com “sistemes de demanda gairebé ideals”.

Com mencionen els mateixos Deaton i Muellbauer (1980), aquests sistemes proporcionen una aproximació arbitrària de primer ordre a qualsevol sistema de demanda, satisfan amb exactitud els axiomes d'elecció, agreguen perfectament els consumidors sense necessitat d'invocar corbes lineals d'Engel, tenen una forma funcional que és consistent amb dades de pressupostos de les llars, són simples d'estimar, en gran mesura eviten la necessitat d'estimació no lineal i poden ser utilitzats per a testar condicions d'homogeneïtat i simetria a través de restriccions lineals en els paràmetres fixats.

Encara que moltes d'aquestes propietats desitjables les posseeixen els models de Rotterdam (Theil, 1965) o els translogarítmics (Christensen *et al.*, 1975; Jorgenson i Lau, 1975), cap d'ells les posseeixen totes simultàniament.

Malgrat la idoneïtat teòrica d'aquests models, la seva utilització a nivell empíric requereix moltes dades que no sempre estan disponibles, ni per a totes les variables que s'han de considerar, ni per als nivells de desagregació utilitzats, etc.

Tot i això, és possible, a partir de l'elasticitat preu de la demanda del propi servei energètic o de l'energia, és a dir, del que s'ha considerat com efecte rebot directe en el capítol 3, determinar la reacció de les llars davant d'un increment en l'eficiència energètica i, per tant, la variació en el consum del propi servei energètic.

A partir d'un pressupost donat, es pot calcular l'estalvi monetari produït per una millora de l'eficiència energètica en un àmbit determinat i redistribuir-lo entre la resta de béns i serveis a partir de la creació de diversos escenaris. Aquest efecte és anomenat *re-spending* en la literatura (Sanne, 2000; Chalkley *et al.*, 2001; Alfredsson, 2004; Druckman *et al.*, 2010; Freire-González, 2011b).

En aquest context, i a través dels escenaris, es poden contemplen múltiples opcions de redistribució de la renda alliberada amb múltiples efectes sobre el consum total d'energia. Una correcta interpretació dels models, escenaris i resultats portaria, no tant a estimacions precises de l'efecte rebot indirecte, com a una anàlisi esmicolada dels efectes indirectes a nivell macroeconòmic que provocaria una millora de l'eficiència energètica a les llars, en funció del context d'anàlisi.

La renda alliberada es vehicularia cap a nou consum o estalvi. Es pot modelitzar el comportament de les llars entre consum i estalvi, o bé considerar una economia tancada i estàtica on l'estalvi és igual a la inversió, i que per tant tots els estalvis acabarien impulsant la mateixa economia en forma de despesa final o inversió.

6.2.2. Modificació exògena en els patrons de consum a les llars

A continuació es mostra la formalització de l'efecte rebot directe i indirecte d'una modificació dels patrons de consum de les llars, independentment de quina sigui la causa que ha provocat la modificació del patró. Els desenvolupaments que es presenten en aquest apartat són una adaptació pròpia dels que apareixen a Druckman *et al.* (2010), amb la incorporació del model Input-output de l'energia desenvolupat en l'apartat 6.1.

A continuació s'obté una equació que defineix l'efecte rebot en aquest context. L'efecte rebot es pot expressar com:

$$ER = \frac{\text{Estalvis calculats} - \text{Estalvis reals}}{\text{Estalvis calculats}} \quad (61)$$

Si els estalvis calculats sense tenir en compte l'efecte rebot són ΔH i el consum d'energia addicional per l'efecte rebot directe i l'efecte *re-spending* en altres béns i serveis és ΔE , la variació en el consum d'energia es pot representar com:

$$ER = \frac{\Delta H - (\Delta H - \Delta E)}{\Delta H} = \frac{\Delta E}{\Delta H} \quad (62)$$

D'altra banda, es pot definir l'increment del consum d'energia per l'efecte rebot directe i l'efecte *re-spending* com:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n u_i \Delta x_i p_i + u_s \Delta s \quad (63)$$

On u_i i u_s serien els operadors que transformarien els increments de despesa i d'estalvi monetaris en consum energètic. En el marc metodològic que es desenvolupa en aquest treball, pel cas de la despesa final de les llars, u_i seria l'operador F del model Input-output de l'energia, obtingut de l'expressió (51).

Partint de la següent situació d'equilibri a les llars:

$$y = x_s p_s + \sum_{i=1}^n x_i p_i + s \quad (64)$$

on y és la renda de la llar o el pressupost total; x_s és la quantitat del servei energètic (o d'energia); p_s és el preu de l'energia; x_i la quantitat del bé o servei i ; p_i és el preu del bé o

servei i , i s és l'estalvi.

L'expressió (64) es pot expressar de la següent manera:

$$\Delta y = \Delta x_s p_s + \sum_{i=1}^n \Delta x_i p_i + \Delta s \quad (65)$$

A continuació, definim una propensió marginal a estalviar (r) com:

$$r = \Delta s / \Delta y \quad (66)$$

D'aquesta expressió s'obté la proporció de la renda estalviada:

$$\Delta s = r \Delta y \quad (67)$$

De les expressions (65) i (67), s'obté:

$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta x_s p_s + \sum_{i=1}^n \Delta x_i p_i + r \Delta y \\ \Delta y - r \Delta y &= \Delta x_s p_s + \sum_{i=1}^n \Delta x_i p_i \\ (1-r) \Delta y &= \Delta x_s p_s + \sum_{i=1}^n \Delta x_i p_i \end{aligned} \quad (68)$$

Es pot considerar la variació de la despesa en un bé o servei en funció de la variació de la renda, a través de l'elasticitat renda de la despesa $\eta_y(x_i p_i)$:

$$\eta_y(x_i p_i) = \frac{\Delta x_i p_i}{\Delta y} \frac{y}{x_i p_i} \quad (69)$$

Aleshores:

$$\Delta x_i p_i = \eta_y(x_i p_i) \frac{\Delta y}{y} x_i p_i \quad (70)$$

Substituint l'expressió (70) en l'equació (68) s'obté la següent expressió:

$$(1-r)\Delta y = \Delta x_s p_s + \sum_{i=1}^n \eta_y(x_i p_i) \frac{\Delta y}{y} x_i p_i \quad (71)$$

Aïllant y :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_y(x_i p_i) x_i p_i \Delta y}{(1-r)\Delta y - \Delta x_s p_s} \quad (72)$$

Substituint aquesta expressió en l'equació (70):

$$\Delta x_i p_i = \eta_y(x_i p_i) \frac{(1-r)\Delta y - \Delta x_s p_s}{\sum_{i=1}^n \eta_y(x_i p_i) x_i p_i} x_i p_i \quad (73)$$

Utilitzant aquesta expressió i les equacions (63) i (67), s'obté la següent expressió definidora de l'increment del consum d'energia per l'efecte *re-spending*:

$$\Delta E = \left(\frac{(1-r)\Delta y - \Delta x_s p_s}{\sum_{i=1}^n \eta_y(x_i p_i) x_i p_i} \right) \sum_{i=1}^n u_i \eta_y(x_i p_i) x_i p_i + u_s r \Delta y \quad (74)$$

Aleshores es pot calcular l'efecte rebot a partir de l'expressió (62), com:

$$ER = \frac{\Delta E}{\Delta H} = \frac{1}{\Delta H} \left(\frac{(1-r)\Delta y - \Delta x_s p_s}{\sum_{i=1}^n \eta_y(x_i p_i) x_i p_i} \right) \sum_{i=1}^n u_i \eta_y(x_i p_i) x_i p_i + u_s r \Delta y \quad (75)$$

L'expressió (75) mostra el càlcul de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic a partir de:

1. Els estalvis d'energia inicialment estimats sense tenir en compte l'efecte rebot (ΔH).

En el capítol 7 es mostra la manera com s'ha calculat l'efecte rebot en els models Input-output de l'energia desenvolupats per Catalunya. Concretament aquest s'ha denominat escenari de referència.

2. L'estalvi monetari de renda disponible (Δy), produït per la millora d'eficiència en un servei energètic concret a les llars. En el cas de la recerca que aquí es porta a terme, aquest increment seria induït per les millores d'eficiència produïdes en els serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars.

Com es mostra al capítol 7, aquest estalvi es calcula per a Catalunya a partir de l'estalvi monetari directe que suposa una millora de l'eficiència sobre la despesa que les llars realitzen en el sector de l'electricitat a Catalunya.

3. La propensió marginal a estalviar (r), que és una variable exògena que caldria estimar per les llars objecte de les estimacions. El tractament que se li dóna en el model desenvolupat podria produir un biaix en les estimacions de l'efecte rebot indirecte. Això és degut a que se suposa que tot el que s'estalvia no genera efecte rebot.

Donat que aquest estalvi podria acabar en major inversió, que podria suposar major despesa en béns i serveis dilatada en el temps i/o en altres regions o països, no s'hauria de restar per al càlcul de l'efecte rebot, sinó donar-li un tractament específic dins el model que mostrés quin efecte rebot produeix la part de l'increment de renda que s'estalvia i a on el produeix.

Per a les estimacions realitzades per a Catalunya, en el capítol posterior, s'ha suposat que aquesta variable és igual a 0, ja que s'ha considerat que tot l'estalvi acabarà en inversió, repercutint en el consum d'altres béns i serveis (fent el supòsit que l'impacte de la inversió que genera l'estalvi és idèntic a la mateixa quantia de despesa en consum final). S'ha considerat que aquesta opció era preferible a obviar-lo en l'anàlisi.

4. Les despeses en béns i serveis ($x_i p_i$) i la despesa en electricitat ($x_s p_s$), és el que conforma el patró de consum de les llars. La variable ($x_i p_i$) és determinada exògenament i el que es calcula són els efectes de la seva variació a partir d'una millora de l'eficiència en l'ús de l'electricitat a les llars.

Pel cas de Catalunya, aquesta variable s'ha obtingut a partir del vector de demanda final dels diferents béns i serveis de les llars que apareix a les TIOC-05, per tal de poder realitzar una correspondència homogènia amb els sectors productius de les taules.

5. Finalment, l'elasticitat renda de la despesa dels diferents béns i serveis ($\eta_y(x_i p_i)$), determina la variació de la despesa en els diferents béns i serveis en incrementar-se la renda disponible de les llars, per la millora de l'eficiència.

Tot i que en posteriors recerques caldria obtenir estimacions de les elasticitats a partir de l'estimació de funcions de demanda per a Catalunya, s'ha realitzat una aproximació per a construir un escenari probable. Al capítol 7 es detallen els escenaris considerats i els resultats de les simulacions.

6.2.3. Modificació en els patrons de consum a les llars induïda per una millora de l'eficiència energètica

En aquest apartat es mostren els nous desenvolupaments metodològics que s'han realitzat en aquesta recerca per a l'estimació de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics per una modificació dels patrons de consum de les llars, quan aquesta modificació ha estat causada per una millora de l'eficiència energètica.

A diferència de l'apartat 6.2.2, en aquest s'ha introduït la millora d'eficiència dins els models, fent que la modificació en els patrons de consum depengui de la millora d'eficiència i de les hipòtesis de redistribució de la renda realitzades (que posteriorment conformaran els escenaris per a les simulacions).

D'aquesta manera, es presenta un model que permet obtenir estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics a partir d'estimacions de l'efecte rebot directe, ampliant el camp d'anàlisi de la qüestió. Aquest model conté dos submodels: un model Input-output de l'energia i un model que s'ha anomenat *re-spending* i que es mostra a continuació.

En el context de la modelització *re-spending* exposada en l'apartat 6.2.2, es parteix de la següent situació d'equilibri:

$$y = x_E p_E + \sum_{i=1}^n x_i p_i + s \quad (76)$$

on y és la renda de la llar o el pressupost total; x_E és la quantitat del servei energètic (o d'energia); p_E és el preu de l'energia o del servei energètic; x_i la quantitat del bé o servei i ; p_i és el preu del bé o servei i , i s és l'estalvi.

Suposant que la renda, el preu de l'energia i l'estalvi es mantenen constants, es pot expressar el model aïllant la nova despesa de la resta de béns i serveis:

$$\sum_{i=1}^n x_i' p_i = y - x_E' p_E - s \quad (77)$$

També es pot expressar com:

$$\sum_{i=1}^n x_i' p_i = y - (x_E + \Delta x_E) p_E - s \quad (78)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i' p_i = y - \left(1 + \frac{\Delta x_E}{x_E}\right) x_E p_E - s \quad (79)$$

L'expressió (79) és l'equació general d'equilibri per al càlcul de la despesa que realitzen la resta de sectors econòmics davant una variació de la despesa monetària en el sector energètic. A partir d'aquesta es poden determinar multitud d'escenaris de despesa de la resta de sectors que contemplin aquest equilibri.

Donat que es realitza la hipòtesi de que la variació de la despesa de les llars en el sector

energètic ve donada per la millora d'eficiència i l'efecte rebot directe corresponent, a continuació es mostren els desenvolupaments que permeten expressar el model en aquests termes.

L'expressió (15) del capítol 3, dedicat als desenvolupaments metodològics de l'efecte rebot directe, mostra com, sota les hipòtesis d'exogeneïtat i simetria, es pot estimar l'efecte rebot directe d'un servei energètic a partir de l'elasticitat preu de la demanda d'energia, a partir de la relació:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{p_s}(x_s) - 1 \quad (80)$$

Donat que la pròpia definició de l'efecte rebot és:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \frac{\Delta x_E}{\Delta \varepsilon} \frac{\varepsilon}{x_E} \quad (81)$$

Es pot aïllar la variació percentual del consum d'energia, quedant-ne l'expressió:

$$\frac{\Delta x_E}{x_E} = \eta_{\varepsilon}(E) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad (82)$$

Incorporant la variació percentual de l'equació (82) dins l'equació (79) i substituint l'elasticitat eficiència energètica de la demanda d'energia per l'expressió (80), queda l'expressió:

$$\sum_{i=1}^n x_i' p_i = y - \left[1 + \left(-\eta_{p_s}(x_s) - 1 \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E - s \quad (83)$$

A partir d'aquesta expressió i sota les hipòtesis considerades per a l'estimació de l'efecte

rebot directe a partir d'elasticitats preu, es poden construir diversos escenaris *re-spending* a partir de l'efecte rebot directe per al consum d'energia i de la variació percentual d'eficiència energètica, que reflecteixin nous patrons de consum. Aquests han

de ser tals que el sumatori de la nova despesa en cadascun dels béns i serveis $\left(\sum_{i=1}^n x'_i p_i \right)$ compleixi les condicions establertes en l'equació (83).

Per a realitzar les simulacions sobre aquest model s'ha considerat que no hi ha estalvi, o bé que tot l'estalvi es trasllada a inversió en la pròpia economia, suposant, a més que la inversió acaba tenint el mateix efecte que la despesa final de consum.

El relaxament d'aquesta hipòtesi afectaria els resultats, com per exemple traslladant part de l'efecte a altres períodes o a altres economies a través de productes financers, moviments de capital o comerç internacional. Caldria en futures recerques desenvolupar en major profunditat el paper de l'estalvi en el model i les seves implicacions a nivell macroeconòmic.

Capítol 7

ESTIMACIONS DE L'EFECTE REBOT DIRECTE I INDIRECTE ESTÀTIC DEL CONSUM D'ELECTRICITAT A LES LLARS A CATALUNYA

En aquest capítol s'ha construït un model que incorpora el desenvolupament empíric d'un model Input-output de l'energia, així com un model *re-spending* per a Catalunya. Aquests han estat desenvolupats de manera teòrica en capítol 6 del present treball.

A partir de la construcció de diversos escenaris i de realitzar simulacions sobre aquest model, s'obtindran estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics de les millores d'eficiència produïdes en els aparells que utilitzen energia elèctrica a les llars a Catalunya.

Per a fer-ho, caldrà tornar a considerar les hipòtesis d'estimació de l'efecte rebot directe a partir de la consideració de les elasticitats preu de l'energia elèctrica (explicitades en el capítol 3), més les hipòtesis implícites existents en els models Input-output de l'energia i en la modelització *re-spending* desenvolupada (detallades en el capítol 6).

L'estimació de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics suposarà realitzar un exercici de simulació sobre el model desenvolupat, el que implicarà l'establiment de diversos escenaris, a partir dels quals es realitzaran les estimacions per l'any 2005 a les llars a Catalunya.

7.1. Variables i dades utilitzades

En aquest apartat s'especifiquen i es defineixen les variables i les dades que han estat necessàries per a realitzar les estimacions. La dificultat en l'obtenció de determinades dades, en una desagregació suficient o per als anys necessaris, ha fet necessària la simplificació de les anàlisis i dels models empírics. La metodologia desenvolupada, però, no perd vigència per a la seva ampliació i utilització en posteriors recerques amb un increment i millora de la base estadística.

7.1.1. Balanços energètics i consum sectorial d'electricitat

S'han obtingut dades anuals pel període 2000-2008 del consum d'energia elèctrica a Catalunya per sectors econòmics, de les estadístiques i balanços energètics que elabora el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio del Govern d'Espanya.¹⁴

Pel que fa a l'energia elèctrica, que és la font energètica en la qual se centren les anàlisis, les estadístiques mencionades proporcionen informació del nombre d'abonats per sector, així com del consum total anual, en MWh.

A continuació, la Taula 16 mostra la sectorització inclosa en els balanços energètics, els codis CCAE (Codi de Classificació d'Activitat Econòmica) de les activitats que inclou cada sector i els consums sectorials d'energia elèctrica a Catalunya l'any 2005, any per al que es realitzaran les simulacions.

¹⁴ Les dades mencionades poden trobar-se a: <http://www.mityc.es/energia/balances/Paginas/Index.aspx>.

Taula 16. Consum sectorial d'electricitat a Catalunya, nombre d'abonats i CCAEs, 2005.

Sector	CCAE-09	Nombre d'abonats	Consum (MWh)
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	01-02-03	32.076	480.652
Extracció i aglomeració de carbons	05-9,9	19	9.957
Extracció de petroli i gas	06-9,1	35	10.014
Combustibles nuclears i altres energies	7,21-24,46-35,3	21	1.179
Coqueries	19,1	0	0
Refineries de petroli	19,2	18	521.419
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	35,1	1.490	1.205.295
Fàbriques de gas - distribució de gas	35,2	152	100.240
Altres minerals (excepte de productes energètics)	07-08	313	269.869
Siderúrgia i fundició	24	587	1.713.110
Metal·lúrgia no fèrria	24,4-24,53-24,54	1.664	255.953
Vidre i productes de vidre	23,1	297	407.463
Ciment, calç i guixos	23,5	106	1.058.948
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	23	1.732	519.487
Química i petroquímica	20-21	1.704	5.788.784
Màquines i transformats metàl·lics	25-26-27-28	10.471	1.659.036
Construcció i reparació naval	30,1-33,15	144	16.224
Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	29-30,9	535	839.099
Construcció d'altres mitjans de transport	30,2-30,3-30,4	50	9.647
Alimentació, begudes i tabac	10-11-12	6.001	2.205.432
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	13-14-15	7.393	1.670.033
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	16	4.366	182.815
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	17	695	1.583.921
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	18-58,1	3.472	339.682
Productes de cautxú i productes plàstics	22-31 a 33	5.314	1.560.295
Treballs de construcció	41-42-43	34.292	316.377
Serveis de transport per ferrocarril	49,1-49,2	469	560.131
Altres empreses de transport	49,31-49,32-49,39-49,4-49,5-50-52	1.398	417.784
Hosteleria	55-56	56.713	2.162.372
Comerç i serveis	31-33,12-45 a 47-58,2-59-62 a 71-73 a 75-77 a 82-85,5-85,6-89-90-92 a 96	381.729	7.422.462
Administració i altres serveis públics	36 a 39-53-60 a 61-72-84 a 88-91-97	65.950	3.519.267
TOTAL	-	619.206	36.806.947

Font: elaboració pròpia a partir dels balanços energètics del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

7.1.2. Taules Input-output

Com s'ha explicat en l'apartat 6.1 les taules Input-output són l'element estadístic clau a partir del qual es desenvolupen tant els models Input-output de Leontief com els models Input-output ambientals i de l'energia. Aquestes són desenvolupades en el marc dels Sistemes de Comptabilitat Nacional (SCN) i les acostumen a elaborar els instituts nacionals i regionals d'estadística.

La complexitat i les grans necessitats d'informació que implica l'elaboració de les taules fa que tot sovint no estiguin disponibles pels anys, regions econòmiques o desagregacions sectorials desitjades.

Pel que fa a Catalunya, l'Institut d'Estadística de Catalunya (IDESCAT) va publicar l'any 2007 les Taules Input-output 2001 (TIOC-01) (Idescat, 2007). Aquestes representen una valuosa font d'informació i base estadística per a la recerca aplicada, ja que permeten aprofundir en el coneixement de l'estructura econòmica del país, amb l'anàlisi de la seva composició i les interrelacions entre diferents agents. Aquestes es troben desagregades en agrupacions de 14, 65 i en 122 sectors productius de l'economia catalana, en funció del grau de detall dels intercanvis entre sectors que es produeixen. La referència metodològica utilitzada per a la seva elaboració va ser el SEC-95.

Posteriorment, l'any 2009 es va realitzar una actualització de les taules del 2001 per a obtenir les taules Input-output 2005 (TIOC-05). A diferència de les primeres, aquestes només estan disponibles per a 14 i 65 sectors productius de l'economia catalana.

Per tal de realitzar una anàlisi Input-output a partir de la metodologia de Leontief és necessari disposar d'una taula Input-output simètrica. Per a la construcció del model input-output de l'energia s'utilitzarà una adaptació de la Taula Destinació Ampliada (TDA)

interior de la TIOC-05 de 65 sectors productius.

La TDA de Catalunya 2005 té dues característiques que la diferencien de les típiques taules de destinació que es troben en els sistemes de comptabilitat nacional (Idescat, 2007):

1) Les branques d'activitat principal, les branques homogènies i els productes són iguals en nombre i tenen una correspondència 1 a 1. Per tant, la TDA és simètrica.

2) La TDA amplia la informació de la taula destinació, de manera que es presenta el valor de la producció en branques homogènies i es fa possible la introducció de les importacions, de manera que s'obté per suma el total de l'oferta per productes. Aquesta ampliació és natural sobre la base de la hipòtesi de tecnologia de la indústria. Cal tenir una Taula d'Origen instrumental que ofereixi el pas d'activitat principal a homogènia. A la TDA es reflecteix l'equilibri entre els usos i recursos de l'economia.

Per tant, la TDA, tal i com ha estat desenvolupada permet realitzar una anàlisi econòmica estructural Input-output a partir de la metodologia de Leontief i els seus posteriors desenvolupaments i derivacions.

Per tal de relacionar els balanços energètics mostrats a l'apartat 7.1.1 amb les TIOC-05, s'ha realitzat l'agregació dels sectors que apareix a les TIOC-05 interior de 65 sectors econòmics fins a arribar a una matriu Input-output amb els mateixos sectors econòmics dels balanços energètics. Les agregacions s'han pogut realitzar a partir dels CCAEs corresponents. Finalment han quedat 31 sectors econòmics.

D'altra banda, el vector del pressupost familiar total en béns i serveis s'ha obtingut del vector de demanda final a les llars de la TDA de Catalunya que a les TIOC-05 s'anomena "consum de les llars".

7.1.3. Elasticitats preu de la demanda d'electricitat a les llars

A part de les dades mencionades, s'han utilitzat també les estimacions realitzades a al capítol 4, de les elasticitats preu de la demanda de l'electricitat, que han estat assimilades a l'efecte rebot directe per als serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars.

Donat que, les taules Input-output, i per tant els models desenvolupats, corresponen a l'any 2005, i les estimacions de les elasticitats s'han realitzat a partir de dades corresponents al període 1991-2002, s'ha realitzat la hipòtesi que els paràmetres estimats romanen constants per l'any 2005.

Això està relacionat amb el fet que l'efecte rebot canvia en cada període, el que idealment faria necessari estimacions any a any del mateix. Caldria, en futures recerques, actualitzar les estimacions dels paràmetres a mesura que es disposés de més dades sobre les variables especificades.

7.2. Escenaris per a les simulacions

Una vegada construït el model, en aquest apartat s'exposen els escenaris escollits per a realitzar les simulacions per a les estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte a les llars.

Tots els escenaris considerats són estàtics, és a dir, s'ha considerat que l'estructura productiva, els preus relatius i la demanda final total es mantenen constants, i només varia el patró de consum de les llars, és a dir, la manera en què es redistribueix la despesa entre els béns i serveis.

En la simulació de cadascun d'aquests escenaris s'avalua el consum d'electricitat total,

directe i indirecte, que realitza tota l'economia posterior a una millora de l'eficiència en l'electricitat a les llars a Catalunya, en relació al consum de la mateixa estructura econòmica sense la millora mencionada.

Com a escenaris més probables se n'han escollit dos: un escenari consistent en la distribució dels estalvis assolits a partir de les elasticitats renda de la demanda d'electricitat a les llars i un segon escenari consistent en una distribució dels estalvis monetaris en funció de la proporció que suposa la despesa en cada sector sobre la despesa total realitzada a les llars.

També s'ha construït un escenari de referència, que permetrà, per comparació amb els escenaris considerats, l'obtenció d'estimacions de l'efecte rebot indirecte amb les dades disponibles.

7.2.1. Escenari de referència (Ref)

Aquest és l'escenari que en el desenvolupament teòric del càlcul de l'efecte rebot indirecte (apartat 6.2.2) s'ha denominat ΔH .

Aquest només contempla la reducció de la despesa monetària relativa al consum d'electricitat a les llars, sense considerar l'increment posterior en el propi consum d'electricitat (el que seria l'efecte rebot directe), ni realitzar cap redistribució posterior dels estalvis assolits (que configuraria l'efecte rebot indirecte). Aquest és l'escenari d'estalvi energètic que es contemplaria quan es realitzen càlculs d'enginyeria, i en la majoria de previsions de reducció del consum energètic a l'hora d'aplicar una política de millora d'eficiència energètica. No contempla cap tipus d'efecte rebot i, per comparació amb els escenaris serveix per a calcular l'efecte rebot directe més indirecte estàtic.

L'equació (79) mostra el nou equilibri pressupostari davant variacions en la despesa de les

llars en el sector de l'electricitat:

$$\sum_{i=1}^n x_i' p_i = y - \left(1 + \frac{\Delta x_E}{x_E}\right) x_E p_E - s \quad (79)$$

A partir dels desenvolupaments mostrats en l'apartat 6.2.3, referent a una modificació dels patrons de consum induït per una millora de l'eficiència, en aquest cas, la nova demanda final del servei energètic objecte de millora de l'eficiència es pot definir, a partir de les equacions (77) i (83) com:

$$x_E^{Ref} p_E = \left[1 + \left(-\eta_{p_s}(x_s) - 1\right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right] x_E p_E \quad (84)$$

Donat que en aquest escenari no hi ha efecte rebot directe, es considera, de manera implícita, que l'elasticitat preu de la demanda de serveis energètics és zero: $\eta_{p_s}(x_s) = 0$. Substituint aquest valor a l'equació (84), la nova despesa monetària realitzada en electricitat seria:

$$x_E^{Ref} p_E = \left[1 - \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right] x_E p_E \quad (85)$$

A l'expressió (85) s'observa com tota la millora d'eficiència produïda a les llars es tradueix de manera directa i proporcional en una reducció de la despesa monetària en el sector de l'electricitat, és a dir, es considera que no hi ha efecte rebot directe.

En aquest escenari no hi ha redistribució dels estalvis monetaris. Aleshores, la despesa realitzada en la resta de béns i serveis de l'economia per part de les llars és la mateixa que la inicial:

$$x_i^{Ref} p_i = x_i p_i \quad (86)$$

Com mostra a l'expressió (86) no hi ha *re-spending*, és a dir, els estalvis assolits per la reducció de la despesa mencionada en el sector de l'electricitat, que serien majors en aquest escenari per la no consideració de l'efecte rebot directe, no es traslladen ni en un major consum en la resta de sectors de l'economia ni en un major estalvi o inversió de les llars.

7.2.2. Escenari elasticitat renda (ER)

Una vegada produïda la millora d'eficiència a les llars, aquest escenari contempla la redistribució dels estalvis monetaris assolits en funció de les elasticitats renda de la demanda de cada sector. A continuació es mostren els desenvolupaments propis realitzats en aquesta recerca.

Partint de l'equació (79), que mostra els nous equilibris pressupostaris davant variacions en la despesa monetària en el sector de l'electricitat a les llars:

$$\sum_{i=1}^n x_i' p_i = y - \left(1 + \frac{\Delta x_E}{x_E}\right) x_E p_E - s \quad (79)$$

A continuació, es pot determinar la nova despesa final per a cadascun dels sectors econòmics existents en l'estructura productiva considerada.

A partir dels desenvolupaments mostrats en l'apartat 6.2.3, referent a una modificació dels patrons de consum induïda per una millora de l'eficiència, en aquest cas, la nova demanda final del servei energètic objecte de millora de l'eficiència es pot definir, a partir de les equacions (77) i (83) com:

$$x_E^{ER} p_E = \left[1 + \left(-\eta_{p_s}(x_s) - 1 \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E \quad (87)$$

D'altra banda, a partir de la pròpia definició d'elasticitat renda de la demanda d'un bé o servei:

$$\eta_y(x_i) = \frac{\Delta x_i}{\Delta y} \frac{y}{x_i} \quad (88)$$

Reorganitzant termes, també es pot expressar com:

$$\frac{\Delta x_i}{x_i} = \eta_y(x_i) \frac{\Delta y}{y} \quad (89)$$

Donat que, de manera genèrica es pot establir la variació de la despesa en la resta de sectors com:

$$x_i^{ER} p_i = \left[1 + \frac{\Delta x_i}{x_i} \right] x_i p_i \quad (90)$$

A partir de les equacions (89) i (90), es pot definir la despesa a cada sector com:

$$x_i^{ER} p_i = \left[1 + \eta_y(x_i) \frac{\Delta y}{y} \right] x_i p_i \quad (91)$$

La variació de la renda ($\frac{\Delta y}{y}$) en aquest cas vindrà donada per la variació monetària en el consum d'electricitat a les llars per la millora d'eficiència energètica. És a dir, a partir de l'expressió (87).

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y}{y} &= \frac{(x_E p_E - x_E^{ER} p_E)}{y} = \frac{\left(x_E p_E - \left[1 + (-\eta_{P_s}(x_s) - 1) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E \right)}{y} = \\ &= \frac{x_E p_E (\eta_{P_s}(x_s) + 1) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}}{y} \end{aligned} \quad (92)$$

Substituint a l'equació (91), s'obté finalment:

$$x_i^{ER} p_i = \left(1 + \eta_y(x_i) \frac{x_E p_E (\eta_{P_s}(x_s) + 1) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}}{y} \right) x_i p_i \quad (93)$$

Per a determinar aquest escenari a Catalunya, i donat que no hi ha prou dades per a realitzar una correcta especificació de totes les funcions de demanda i realitzar estimacions de les elasticitats renda per a tots els sectors pels quals s'ha realitzat la desagregació sectorial a les taules Input-output, s'ha realitzat un procediment més simple que cal considerar amb cura per la possible obtenció de resultats esbiaixats.

Donat que es disposa de les TDA ampliades per a Catalunya pels anys 2001 i 2005, s'ha pogut observar l'evolució que ha seguit la despesa i la renda total a partir d'establir a la TDA del 2001 les mateixes agregacions que s'han realitzat a les taules del 2005.

En primer lloc s'ha calculat la nova despesa monetària en electricitat a les llars amb la

millora d'eficiència i l'efecte rebot directe i s'ha calculat l'estalvi monetari produït en relació a la despesa inicial. Posteriorment, s'ha calculat la nova despesa en els diferents béns i serveis en funció de l'evolució que ha seguit aquesta despesa entre 2001 i 2005, en relació a la variació que ha sofert la renda durant els mateixos anys.

D'aquesta manera s'ha obtingut una aproximació a l'elasticitat renda de la demanda dels diferents béns i serveis, $\eta_y(x_i)$, que ha permès l'obtenció de la nova demanda un cop conegut l'increment de renda disponible per la millora d'eficiència energètica (amb el supòsit de que $s=0$).

De tota manera, com s'ha detallat a l'apartat 6.2.1, l'obtenció d'uns bons estimadors s'hauria de fer a partir de la correcta especificació i estimació d'equacions de demanda per a tots els béns i serveis de l'economia, fet que no invalida el mètode mostrat.

7.2.3. Escenari proporcional (Pro)

Una vegada produïda la millora d'eficiència a les llars, aquest escenari contempla la redistribució dels estalvis monetaris assolits a partir de la proporció de despesa que suposa cada sector sobre la despesa total que realitzen les llars. A continuació es mostren els desenvolupaments propis realitzats en aquesta recerca.

Tornant a l'equació (79), que mostra els nous equilibris pressupostaris davant de variacions en la despesa de les llars en el sector de l'electricitat:

$$\sum_{i=1}^n x'_i p_i = y - \left(1 + \frac{\Delta x_E}{x_E}\right) x_E p_E - s \quad (79)$$

A continuació es determinarà la nova despesa final per a cadascun dels sectors de

l'estructura productiva considerada.

De la mateixa manera que en l'escenari anterior, la nova demanda final del servei energètic objecte de millora de l'eficiència es pot definir com:

$$x_E^{Pro} p_E = \left[1 + \left(-\eta_{p_s}(x_s) - 1 \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E \quad (94)$$

D'altra banda, establint la variació en la demanda final en cada sector en funció de la proporció que suposa sobre la demanda final total (exceptuant el sector de l'electricitat):

$$x_i^{Pro} p_i = x_i p_i + \frac{x_i p_i}{y - x_E^{Pro} p_E} \Delta y = x_i p_i \left[1 + \frac{\Delta y}{y - x_E^{Pro} p_E} \right] \quad (95)$$

Donat que la variació de la renda monetària disponible és igual a l'estalvi produït al sector de l'electricitat a les llars:

$$\Delta y = x_E p_E - x_E^{Pro} p_E \quad (96)$$

A partir de les expressions (95) i (96) es té que:

$$x_i^{Pro} p_i = x_i p_i \left[1 + \frac{x_E p_E - x_E^{Pro} p_E}{y - x_E^{Pro} p_E} \right] \quad (97)$$

D'altra banda, a partir de l'expressió (94), que mostra el valor del consum d'electricitat en l'escenari proporcional, i l'expressió (97):

$$x_i^{Pro} p_i = x_i p_i \left[1 + \frac{x_E p_E - \left[1 + (-\eta_{P_s}(x_s) - 1) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E}{y - \left[1 + (-\eta_{P_s}(x_s) - 1) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E} \right] \quad (98)$$

A partir de l'expressió (83), i considerant que no hi ha estalvi per part de les llars ($s = 0$), s'arriba a la següent equació:

$$x_i^{Pro} p_i = x_i p_i \left[1 + \frac{x_E p_E \left(1 - \left[1 + (-\eta_{P_s}(x_s) - 1) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] \right)}{\sum_{i=1}^n x_i' p_i} \right] \quad (99)$$

L'expressió (99) defineix la nova despesa que realitzaran les llars en cadascun dels sectors econòmics, a partir de l'estimació de l'efecte rebot directe, considerant un escenari proporcional i les hipòtesis formulades al llarg de tota la recerca.

7.3. Resultats de les simulacions

En aquest apartat es presenten els principals resultats de les simulacions realitzades a partir del model Input-output de l'energia i el model *re-spending* desenvolupats per Catalunya i els escenaris considerats en el capítol anterior.

A mode d'exemple, s'ha realitzat en primer lloc, una simulació per una millora de l'eficiència del 10%, que mostra els resultats que proporciona el model en termes de consum total d'electricitat.

Cal tenir en compte que el percentatge de millora d'eficiència utilitzat tindrà efectes sobre el patró de consum i el consum total d'electricitat però no sobre l'efecte rebot

resultant (mesurat en termes percentuals), ja que la linealitat implícita del model fa que aquesta magnitud sigui independent de la millora d'eficiència produïda.

Posteriorment, s'ha realitzat una estimació de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics en els escenaris considerats.

7.3.1. Millora de l'eficiència del 10%: nous patrons de consum i consum total d'electricitat

En aquest apartat s'ha realitzat una aplicació del model, a mode d'exemple, considerant una millora de l'eficiència del 10% en el consum elèctric a les llars. D'aquesta simulació s'han obtingut uns nous patrons de consum i, per tant, un nou consum total d'energia elèctrica que hauria de realitzar tota l'economia per a satisfer aquest nou patró, resultat de l'aplicació del model input-output de l'energia.

7.3.1.1. *Nou patró de consum derivat de la millora d'eficiència energètica en l'ús domèstic d'electricitat*

A continuació, es mostra el patró de consum final a les llars suposant una millora de l'eficiència del 10% en el consum d'energia elèctrica a les llars a Catalunya. La simulació s'ha realitzat per l'escenari de referència, l'escenari basat en elasticitats renda i l'escenari proporcional. Posteriorment s'analitzaran les necessitats energètiques directes i indirectes de cadascun d'aquests patrons, per tal de calcular l'efecte rebot directe més indirecte estàtics.

Les simulacions s'han realitzat en primer lloc considerant un efecte rebot directe de l'electricitat a les llars del 36%, corresponent a l'estimació realitzada en el capítol 4, del consum d'electricitat a les llars a Catalunya (veure Taula 17). En aquest cas, l'estalvi

monetari en el sector corresponent al consum d'electricitat a les llars, i que es repartirà entre la resta de sectors econòmics, resulta ser de 33.534.360 €.

D'altra banda, la Taula 18 mostra el patró de consum final de les llars en els mateixos escenaris, considerant un efecte rebot directe de l'electricitat a les llars a llarg termini del 49%, corresponent a l'estimació realitzada en el capítol 4. En aquest cas, l'estalvi monetari en el sector corresponent al consum d'electricitat a les llars, que es repartirà entre la resta de sectors econòmics, és de 26.722.690 €.

Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic
del consum d'electricitat a les llars a Catalunya

Taula 17. Patró de consum final de les llars a Catalunya segons escenari. Millora de l'eficiència en electricitat del 10%. Elasticitat preu de la demanda a curt termini. Milers d'€ del 2005.

Producte	Escenari inicial	Escenari de referència	Escenari elasticitats renda	Escenari proporcional
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	364.245,50	364.245,50	364.288,62	364.407,60
Extracció i aglomeració de carbons	33,53	33,53	33,50	33,55
Extracció de petroli i gas	33,53	33,53	33,50	33,55
Combustibles nuclears i altres energies	220.573,59	220.573,59	220.617,44	220.671,75
Coqueries	75.490,98	75.490,98	75.481,41	75.524,57
Refineries de petroli	75.490,98	75.490,98	75.481,41	75.524,57
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	523.974,30	471.576,87	490.439,94	490.439,94
Fàbriques de gas - distribució de gas	122.887,40	122.887,40	122.916,98	122.942,09
Altres minerals (excepte de productes energètics)	5.962,10	5.962,10	5.982,77	5.964,75
Siderúrgia i fundició	44,93	44,93	44,93	44,95
Metal·lúrgia no fèrria	44,93	44,93	44,93	44,95
Vidre i productes de vidre	1.928,90	1.928,90	1.930,46	1.929,76
Ciment, calç i guixos	7.212,70	7.212,70	7.217,20	7.215,91
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	4.739,60	4.739,60	4.742,25	4.741,71
Química i petroquímica	353.585,18	353.585,18	353.902,38	353.742,53
Màquines i transformats metàl·lics	142.479,15	142.479,15	142.584,21	142.542,56
Construcció i reparació naval	23.511,45	23.511,45	23.554,34	23.521,91
Vehícles de motor, remolcs i semiremolcs	180.812,10	180.812,10	180.755,78	180.892,57
Construcció d'altres mitjans de transport	23.511,45	23.511,45	23.554,34	23.521,91
Alimentació, begudes i tabac	2.462.507,80	2.462.507,80	2.463.015,82	2.463.603,70
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	231.474,90	231.474,90	231.306,01	231.577,91
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	36.245,20	36.245,20	36.350,76	36.261,33
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	65.785,50	65.785,50	66.291,38	65.814,78
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	237.073,40	237.073,40	237.104,25	237.178,91
Productes de cautxú i productes plàstics	19.025,40	19.025,40	19.071,63	19.033,87
Treballs de construcció	844.766,50	844.766,50	845.218,57	845.142,45
Serveis de transport per ferrocarril	206.353,10	206.353,10	206.325,38	206.444,93
Altres empreses de transport	5.044.376,90	5.044.376,90	5.046.272,52	5.046.621,83
Hosteleria	18.075.780,20	18.075.780,20	18.085.083,94	18.083.824,56
Comerç i serveis	36.836.492,20	36.836.492,20	36.855.292,70	36.852.885,74
Administració i altres serveis públics	9.689.648,00	9.689.648,00	9.692.725,74	9.693.960,24
TOTAL	75.876.091,40	75.823.693,97	75.877.665,08	75.876.091,40

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05.

Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic
del consum d'electricitat a les llars a Catalunya

Taula 18. Patró de consum final de les llars a Catalunya segons escenari. Millora de l'eficiència en electricitat del 10%. Elasticitat preu de la demanda a llarg termini. Milers d'€ del 2005.

Producte	Escenari inicial	Escenari de referència	Escenari elasticitats renda	Escenari proporcional
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	364.245,50	364.245,50	364.279,86	364.374,68
Extracció i aglomeració de carbons	33,53	33,53	33,51	33,55
Extracció de petroli i gas	33,53	33,53	33,51	33,55
Combustibles nuclears i altres energies	220.573,59	220.573,59	220.608,54	220.651,82
Coqueries	75.490,98	75.490,98	75.483,35	75.517,75
Refineries de petroli	75.490,98	75.490,98	75.483,35	75.517,75
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	523.974,30	471.576,87	497.251,61	497.251,61
Fàbriques de gas - distribució de gas	122.887,40	122.887,40	122.910,97	122.930,98
Altres minerals (excepte de productes energètics)	5.962,10	5.962,10	5.978,57	5.964,21
Siderúrgia i fundició	44,93	44,93	44,93	44,95
Metal·lúrgia no fèrria	44,93	44,93	44,93	44,95
Vidre i productes de vidre	1.928,90	1.928,90	1.930,14	1.929,58
Ciment, calç i guixos	7.212,70	7.212,70	7.216,29	7.215,26
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	4.739,60	4.739,60	4.741,71	4.741,28
Química i petroquímica	353.585,18	353.585,18	353.837,95	353.710,57
Màquines i transformats metàl·lics	142.479,15	142.479,15	142.562,87	142.529,68
Construcció i reparació naval	23.511,45	23.511,45	23.545,63	23.519,79
Vehícles de motor, remolcs i semiremolcs	180.812,10	180.812,10	180.767,22	180.876,22
Construcció d'altres mitjans de transport	23.511,45	23.511,45	23.545,63	23.519,79
Alimentació, begudes i tabac	2.462.507,80	2.462.507,80	2.462.912,63	2.463.381,10
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	231.474,90	231.474,90	231.340,31	231.556,99
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	36.245,20	36.245,20	36.329,32	36.258,05
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	65.785,50	65.785,50	66.188,62	65.808,83
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	237.073,40	237.073,40	237.097,99	237.157,48
Productes de cautxú i productes plàstics	19.025,40	19.025,40	19.062,24	19.032,15
Treballs de construcció	844.766,50	844.766,50	845.126,75	845.066,09
Serveis de transport per ferrocarril	206.353,10	206.353,10	206.331,01	206.426,28
Altres empreses de transport	5.044.376,90	5.044.376,90	5.045.887,47	5.046.165,83
Hosteleria	18.075.780,20	18.075.780,20	18.083.194,12	18.082.190,55
Comerç i serveis	36.836.492,20	36.836.492,20	36.851.473,84	36.849.555,80
Administració i altres serveis públics	9.689.648,00	9.689.648,00	9.692.100,58	9.693.084,31
TOTAL	75.876.091,40	75.823.693,97	75.877.345,43	75.876.091,40

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05.

S'observa com en l'escenari de referència, és a dir aquell on no es considera ni l'efecte rebot directe ni indirecte, només varia la demanda del sector "Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica". En l'escenari basat en elasticitats renda de la demanda, tots els sectors pateixen certa variació en la seva demanda final, en funció de l'elasticitat corresponent, mentre que en l'escenari proporcional varien totes les demandes finals en funció de la despesa que suposa cada sector sobre la demanda total.

7.3.1.2. Consum total d'electricitat segons escenari, derivat de la millora d'eficiència

A continuació, la Taula 19, la Taula 20, la Taula 21 i la Taula 22 mostren els resultats de les simulacions realitzades en els escenaris considerats per una millora de l'eficiència energètica en l'ús d'energia elèctrica de les llars del 10%, en termes de consum directe i indirecte d'energia elèctrica.

Els resultats s'han obtingut d'aplicar els nous patrons de consum obtinguts als models Input-output de l'energia desenvolupats. De la mateixa manera que en l'apartat anterior, es mostren els resultats per un efecte rebot directe del consum d'electricitat a les llars a curt i a llarg termini.

Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic
del consum d'electricitat a les llars a Catalunya

Taula 19. Consum total d'electricitat segons escenaris. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a curt termini. En MWh, 2005

Producte	Escenari inicial	Escenari de referència	Escenari elasticitats renda	Escenari proporcional
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	70.321,32	70.321,32	70.329,65	70.352,62
Extracció i aglomeració de carbons	34,05	34,05	34,01	34,06
Extracció de petroli i gas	34,23	34,23	34,19	34,25
Combustibles nuclears i altres energies	8.627,18	8.627,18	8.628,90	8.631,02
Coqueries	1.372,37	1.372,37	1.372,20	1.372,98
Refineries de petroli	54.493,96	54.493,96	54.487,05	54.518,21
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	213.777,17	192.399,45	200.095,43	200.095,43
Fàbriques de gas - distribució de gas	14.030,35	14.030,35	14.033,73	14.036,59
Altres minerals (excepte de productes energètics)	3.145,58	3.145,58	3.156,49	3.146,98
Siderúrgia i fundició	69,79	69,79	69,78	69,82
Metal·lúrgia no fèrria	12,54	12,54	12,53	12,54
Vidre i productes de vidre	1.150,72	1.150,72	1.151,65	1.151,23
Ciment, calç i guixos	3.626,89	3.626,89	3.629,16	3.628,51
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	3.968,86	3.968,86	3.971,07	3.970,62
Química i petroquímica	132.624,13	132.624,13	132.743,11	132.683,15
Màquines i transformats metàl·lics	19.320,20	19.320,20	19.334,44	19.328,79
Construcció i reparació naval	2.588,15	2.588,15	2.592,87	2.589,30
Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	17.357,08	17.357,08	17.351,67	17.364,80
Construcció d'altres mitjans de transport	2.363,83	2.363,83	2.368,14	2.364,88
Alimentació, begudes i tabac	471.264,12	471.264,12	471.361,34	471.473,85
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	71.004,42	71.004,42	70.952,61	71.036,02
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	5.858,42	5.858,42	5.875,48	5.861,03
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	30.676,10	30.676,10	30.911,99	30.689,75
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	27.464,18	27.464,18	27.467,76	27.476,41
Productes de cautxú i productes plàstics	6.901,72	6.901,72	6.918,50	6.904,80
Treballs de construcció	50.057,35	50.057,35	50.084,14	50.079,63
Serveis de transport per ferrocarril	325.215,43	325.215,43	325.171,74	325.360,16
Altres empreses de transport	270.764,16	270.764,16	270.865,91	270.884,66
Hosteleria	3.025.082,00	3.025.082,00	3.026.639,04	3.026.428,27
Comerç i serveis	3.652.990,69	3.652.990,69	3.654.855,09	3.654.616,40
Administració i altres serveis públics	1.233.629,30	1.233.629,30	1.234.021,14	1.234.178,31
TOTAL	9.719.826,30	9.698.448,58	9.710.520,82	9.710.375,08

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05.

Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic
del consum d'electricitat a les llars a Catalunya

Taula 20. Percentatge de variació del consum total d'electricitat segons escenari respecte l'escenari de inicial. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a curt termini. En MWh, 2005

Producte	Escenari de referència	Escenari elasticitats renda	Escenari proporcional
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	0%	0,012%	0,045%
Extracció i aglomeració de carbons	0%	-0,117%	0,045%
Extracció de petroli i gas	0%	-0,117%	0,045%
Combustibles nuclears i altres energies	0%	0,020%	0,045%
Coqueries	0%	-0,012%	0,045%
Refineries de petroli	0%	-0,013%	0,045%
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	-10,00%	-6,40%	-6,40%
Fàbriques de gas - distribució de gas	0%	0,024%	0,045%
Altres minerals (excepte de productes energètics)	0%	0,347%	0,045%
Siderúrgia i fundició	0%	-0,014%	0,045%
Metal·lúrgia no fèrria	0%	-0,080%	0,045%
Vidre i productes de vidre	0%	0,081%	0,045%
Ciment, calç i guixos	0%	0,063%	0,045%
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	0%	0,056%	0,045%
Química i petroquímica	0%	0,090%	0,045%
Màquines i transformats metàl·lics	0%	0,074%	0,045%
Construcció i reparació naval	0%	0,182%	0,045%
Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	0%	-0,031%	0,045%
Construcció d'altres mitjans de transport	0%	0,182%	0,045%
Alimentació, begudes i tabac	0%	0,021%	0,045%
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	0%	-0,073%	0,045%
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	0%	0,291%	0,045%
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	0%	0,769%	0,045%
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	0%	0,013%	0,045%
Productes de cautxú i productes plàstics	0%	0,243%	0,045%
Treballs de construcció	0%	0,054%	0,045%
Serveis de transport per ferrocarril	0%	-0,013%	0,045%
Altres empreses de transport	0%	0,038%	0,045%
Hosteleria	0%	0,051%	0,045%
Comerç i serveis	0%	0,051%	0,045%
Administració i altres serveis públics	0%	0,032%	0,045%
TOTAL	-0,22%	-0,096%	-0,097%

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05.

Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic
del consum d'electricitat a les llars a Catalunya

Taula 21. Consum total d'electricitat segons escenaris. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a llarg termini. En MWh, 2005

Producte	Escenari inicial	Escenari de referència	Escenari elasticitats renda	Escenari proporcional
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	70.321,32	70.321,32	70.327,95	70.346,26
Extracció i aglomeració de carbons	34,05	34,05	34,02	34,06
Extracció de petroli i gas	34,23	34,23	34,20	34,24
Combustibles nuclears i altres energies	8.627,18	8.627,18	8.628,55	8.630,24
Coqueries	1.372,37	1.372,37	1.372,23	1.372,86
Refineries de petroli	54.493,96	54.493,96	54.488,46	54.513,28
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	213.777,17	192.399,45	202.874,53	202.874,53
Fàbriques de gas - distribució de gas	14.030,35	14.030,35	14.033,04	14.035,32
Altres minerals (excepte de productes energètics)	3.145,58	3.145,58	3.154,27	3.146,70
Siderúrgia i fundició	69,79	69,79	69,78	69,82
Metal·lúrgia no fèrria	12,54	12,54	12,53	12,54
Vidre i productes de vidre	1.150,72	1.150,72	1.151,46	1.151,13
Ciment, calç i guixos	3.626,89	3.626,89	3.628,70	3.628,18
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	3.968,86	3.968,86	3.970,62	3.970,26
Química i petroquímica	132.624,13	132.624,13	132.718,94	132.671,16
Màquines i transformats metàl·lics	19.320,20	19.320,20	19.331,55	19.327,05
Construcció i reparació naval	2.588,15	2.588,15	2.591,92	2.589,07
Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	17.357,08	17.357,08	17.352,77	17.363,23
Construcció d'altres mitjans de transport	2.363,83	2.363,83	2.367,27	2.364,67
Alimentació, begudes i tabac	471.264,12	471.264,12	471.341,59	471.431,24
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	71.004,42	71.004,42	70.963,14	71.029,60
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	5.858,42	5.858,42	5.872,02	5.860,50
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	30.676,10	30.676,10	30.864,08	30.686,98
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	27.464,18	27.464,18	27.467,03	27.473,92
Productes de cautxú i productes plàstics	6.901,72	6.901,72	6.915,09	6.904,17
Treballs de construcció	50.057,35	50.057,35	50.078,70	50.075,11
Serveis de transport per ferrocarril	325.215,43	325.215,43	325.180,62	325.330,76
Altres empreses de transport	270.764,16	270.764,16	270.845,24	270.860,19
Hosteleria	3.025.082,00	3.025.082,00	3.026.322,76	3.026.154,81
Comerç i serveis	3.652.990,69	3.652.990,69	3.654.476,39	3.654.286,18
Administració i altres serveis públics	1.233.629,30	1.233.629,30	1.233.941,55	1.234.066,79
TOTAL	9.719.826,30	9.698.448,58	9.712.410,99	9.712.294,86

Font: elaboració pròpia a partir de les TIOC-05.

Estimacions de l'efecte rebot directe i indirecte estàtic
del consum d'electricitat a les llars a Catalunya

Taula 22. Percentatge de variació del consum total d'electricitat als sectors econòmics segons escenari respecte l'escenari de inicial. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. Efecte rebot directe a llarg termini. En MWh, 2005

Producte	Escenari de referència	Escenari elasticitats renda	Escenari proporcional
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	0%	0,009%	0,035%
Extracció i aglomeració de carbons	0%	-0,088%	0,035%
Extracció de petroli i gas	0%	-0,088%	0,035%
Combustibles nuclears i altres energies	0%	0,016%	0,035%
Coqueries	0%	-0,010%	0,035%
Refineries de petroli	0%	-0,010%	0,035%
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	-10,00%	-5,10%	-5,10%
Fàbriques de gas - distribució de gas	0%	0,019%	0,035%
Altres minerals (excepte de productes energètics)	0%	0,276%	0,035%
Siderúrgia i fundició	0%	-0,014%	0,035%
Metal·lúrgia no fèrria	0%	-0,080%	0,035%
Vidre i productes de vidre	0%	0,064%	0,035%
Ciment, calç i guixos	0%	0,050%	0,035%
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	0%	0,044%	0,035%
Química i petroquímica	0%	0,071%	0,035%
Màquines i transformats metàl·lics	0%	0,059%	0,035%
Construcció i reparació naval	0%	0,146%	0,035%
Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	0%	-0,025%	0,035%
Construcció d'altres mitjans de transport	0%	0,146%	0,035%
Alimentació, begudes i tabac	0%	0,016%	0,035%
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	0%	-0,058%	0,035%
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	0%	0,232%	0,035%
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	0%	0,613%	0,035%
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	0%	0,010%	0,035%
Productes de cautxú i productes plàstics	0%	0,194%	0,035%
Treballs de construcció	0%	0,043%	0,035%
Serveis de transport per ferrocarril	0%	-0,011%	0,035%
Altres empreses de transport	0%	0,030%	0,035%
Hosteleria	0%	0,041%	0,035%
Comerç i serveis	0%	0,041%	0,035%
Administració i altres serveis públics	0%	0,025%	0,035%
TOTAL	-0,22%	-0,076%	-0,077%

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05

D'aquesta manera, s'observa com els nous patrons de consum, induïts per una millora de l'eficiència energètica, porten a una variació en el consum total d'electricitat que ha de realitzar tot el teixit productiu català per a satisfer-los.

D'altra banda, s'observa com la despesa en el sector de l'electricitat és poc rellevant en relació a la despesa total de les llars, pel que els estalvis monetaris de millorar l'eficiència no són massa importants en relació a la despesa total. Això és independent a la magnitud que pugui assolir l'efecte rebot en els serveis energètics que consumeixen electricitat.

A mode de resum, si es considera una redistribució dels estalvis generats per la millora d'eficiència energètica entre la resta de béns i serveis, la Taula 23 mostra la reducció percentual total de cada escenari respecte el consum total d'energia de l'escenari inicial.

Taula 23. Variació total del consum d'electricitat en els diferents escenaris davant una millora de l'eficiència de l'electricitat del 10%, a les llars a Catalunya, 2005

Escenaris	Curt termini (Efecte rebot directe del 36%)	Llarg termini (Efecte rebot directe del 49%)
Referència	-4,071%	
Elasticitats renda	-2,578%	-2,054%
Proporcional	-2,579%	-2,055%

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05.

S'observa a la Taula 23 com a partir del model desenvolupat, una millora d'eficiència energètica produeix una reducció del consum total d'electricitat tant en l'escenari basat en l'estimació d'elasticitats renda de la demanda com en l'escenari proporcional. A més, els resultats proporcionats en aquests dos escenaris són molt similars.

En l'escenari de referència, on només es consideren els efectes de la millora d'eficiència del 10% sobre el mateix consum d'electricitat a les llars (és a dir, sense considerar la redistribució dels estalvis generats), es produiria una reducció del consum total (directe i

indirecte) d'energia elèctrica del 4,071%. Aquesta és la reducció prevista de consum energètic sense considerar l'existència d'efecte rebot, és a dir, contemplant només una reducció del consum que les llars realitzen en el sector "Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica".

7.3.2. Efecte rebot en els escenaris considerats

Per a obtenir estimacions de l'efecte rebot directe més indirecte estàtics, tal i com mostra l'expressió (62), s'ha comparat el consum total d'electricitat induït per l'escenari basat en elasticitats renda i per l'escenari proporcional, en relació al consum d'electricitat de l'escenari de referència, que no contempla efecte rebot (variació inicialment esperada del consum d'electricitat).

Taula 24. Efecte rebot directe i indirecte estàtic per al consum d'electricitat a les llars estimat segons escenari, 2005

Escenaris	Curt termini	Llarg termini
	(Efecte rebot directe del 36%)	(Efecte rebot directe del 49%)
Elasticitats renda	36,57%	49,53%
Proporcional	36,65%	49,52%

Font: elaboració pròpia a partir de les TIOC-05.

S'observa com l'efecte rebot directe i indirecte estàtic seria d'entre el 36,57% i el 36,65%, utilitzant els valors de les elasticitats preu de la demanda d'electricitat a curt termini; i d'entre el 49,53% i el 49,52%, utilitzant els valors de les elasticitats preu de la demanda d'electricitat a llarg termini. Això suposa que una millora de l'eficiència en l'electricitat a les llars que hagués de produir una reducció esperada del consum de 10 unitats, acabaria sent d'unes 6,4 unitats a curt termini, i d'unes 5,1 a llarg termini, considerant els efectes directes més els indirectes estàtics.

Capítol 8

ANÀLISI ESTRUCTURAL DE LES RELACIONS ENTRE EFICIÈNCIA ENERGÈTICA A LES LLARS I ESTRUCTURA PRODUCTIVA

Com s'ha mostrat, les relacions entre progrés tecnològic, estructura econòmica i consum de recursos són força complexes. Les noves tecnologies a les llars que milloren la productivitat de l'energia, i dels recursos en general, acaben produint en molts casos un increment de la renda disponible, millorant el benestar material i no una reducció del consum de recursos i de les emissions de contaminants com podria esperar-se.

L'efecte rebot s'ha de considerar des d'una perspectiva el més àmplia possible, ja que, com s'ha vist, la consideració només de l'efecte rebot directe podria resultar insuficient per a treure conclusions. Pel que fa a les llars, en l'anàlisi d'una millora de l'eficiència en l'ús d'un servei energètic, no tan sols és rellevant l'efecte rebot directe, sinó el context social i econòmic en el que està immersa la llar.

Aquest capítol mostra com la configuració de l'estructura econòmica amb la qual interactua la llar que ha vist millorada l'eficiència en l'ús d'un recurs energètic, resulta clau en la dimensió que pot arribar a assolir l'efecte rebot. També mostra en quina mesura l'obtenció de l'efecte rebot directe ens proporciona informació sobre l'efecte rebot indirecte que es pot assolir, que és funció del context social i econòmic.

Per a fer-ho, i tornant al model desenvolupat al capítol 6, s'han caracteritzat uns escenaris extrems que proporcionaran els límits estructurals, tant superior com inferior, de l'efecte rebot directe i indirecte des d'una perspectiva estàtica. A partir d'aquests també es realitzarà, per una banda, una anàlisi estructural de les relacions entre l'efecte rebot i l'estructura productiva i, per una altra, de les relacions entre les dues tipologies d'efecte rebot analitzades en aquest treball (efecte rebot directe i indirecte).

8.1. Escenaris extrems per a una anàlisi estructural de l'efecte rebot

En aquest apartat s'han determinat uns escenaris extrems que proporcionen els límits superior i inferior de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics donada una estructura econòmica determinada.¹⁵

8.1.1. Escenari pitjor dels casos (P)

Aquest escenari contempla què passaria en el pitjor dels casos, és a dir, si tots els estalvis monetaris assolits per la millora de l'eficiència energètica en l'ús d'electricitat per les llars es destinessin íntegrament a l'adquisició del bé o servei que suposa un major coeficient d'arrossegament relatiu en el consum d'electricitat, μ_j (veure apartat 6.1.2).

A partir dels desenvolupaments mostrats, la nova demanda final del servei energètic objecte de millora de l'eficiència es pot definir com:

$$x_E^P p_E = \left[1 + \left(-\eta_{P_s}(x_s) - 1 \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E \quad (100)$$

Per al sector amb màxim μ_j :

$$x_j^P p_j = x_j p_j + x_E^P p_E = x_j p_j + \left[1 + \left(-\eta_{P_s}(x_s) - 1 \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E \quad (101)$$

D'altra banda, per a tots els altres sectors exceptuant el de l'electricitat i també el que té màxim μ_j , la despesa monetària seria:

¹⁵ En tota aquesta anàlisi cal tenir present que com major desagregació presentin les taules Input-output utilitzades, més extrems resultaran els escenaris.

$$x_{i-j}^P p_{i-j} = x_{i-j} p_{i-j} \quad (102)$$

Sent x_j aquell sector que té el major coeficient d'arrossegament en el consum d'electricitat.

8.1.2. Escenari millor dels casos (M)

Aquest escenari contempla què passaria en el millor dels casos, és a dir, si tots els estalvis monetaris assolits per la millora de l'eficiència energètica es destinessin íntegrament al consum del bé o servei que suposa un menor coeficient d'arrossegament relatiu en el consum d'electricitat, μ_z (veure apartat 6.1.2).

A partir dels desenvolupaments mostrats, la nova demanda final del servei energètic objecte de millora de l'eficiència es pot definir com:

$$x_E^M p_E = \left[1 + \left(-\eta_{P_s}(x_s) - 1 \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E \quad (103)$$

Per al sector amb mínim μ_z :

$$x_z^M p_z = x_z p_z + x_E^M p_E = x_z p_z + \left[1 + \left(-\eta_{P_s}(x_s) - 1 \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right] x_E p_E \quad (104)$$

Per tots els sectors exceptuant el d'electricitat i exceptuant també el que té mínim μ_z :

$$x_{i-z}^M p_{i-z} = x_{i-z} p_{i-z} \quad (105)$$

Sent x_z aquell sector que té el menor coeficient d'arrossegament en el consum d'electricitat.

Els escenaris millor i pitjor marquen els límits inferior i superior (respectivament) de l'efecte rebot directe i indirecte estàtics, donada una estructura econòmica determinada i una elasticitat preu de la demanda dels serveis energètics.

No és realista pensar que, en condicions normals, aquests escenaris es produirien a nivell macroeconòmic, malgrat això podrien produir-se en determinats àmbits a nivell microeconòmic. L'escenari més probable a nivell macroeconòmic seria el basat en el càlcul d'elasticitats renda (veure apartat 7.2.2), és a dir, observant com es modifica el patró de consum quan es produeix un increment de la renda disponible a les llars.

8.2. Determinació dels sectors clau en el consum d'energia elèctrica: estimacions per a Catalunya

En aquest apartat s'han calculat els coeficients d'arrossegament en termes de consum d'energia elèctrica dels sectors econòmics que apareixen a les TIOC-2005. Aquests mostren la importància de cada sector econòmic en el consum total d'energia elèctrica que fa l'economia així com els possibles efectes d'una redistribució de la despesa final de les llars. Els coeficients d'arrossegament que presenten els valors màxim i mínim han estat utilitzats per a determinar els escenaris extrems.

Com s'ha indicat, per a determinar l'efecte rebot directe i indirecte en funció de la nova distribució de la despesa final de les llars o el nou patró de consum final, es pot calcular el lloc que ocuparia cada sector econòmic pel que fa a la importància en la capacitat d'arrossegament relativa en el consum d'energia elèctrica, donada una estructura productiva.

Aleshores, l'efecte rebot resultarà major o menor en funció de la importància que tingui el propi sector energètic en l'arrossegament, en relació a la resta de sectors (ja que es reduirà el consum directe d'energia elèctrica), i del sector destinació dels estalvis monetaris originats per la millora d'eficiència energètica.

Si els estalvis monetaris es destinen al consum de béns i serveis amb elevats coeficients d'arrossegament relatiu al consum d'energia elèctrica, l'efecte rebot resultarà elevat. Si per contra, els estalvis es destinen majoritàriament a l'adquisició de béns i serveis que no tenen elevats coeficients d'arrossegament relatiu en el consum d'energia elèctrica, l'efecte rebot resultant serà menor. D'aquesta manera, es poden construir diferents escenaris front una millora de l'eficiència energètica a les llars, i proporcionar una guia per als decisors polítics a l'hora de fer front a l'efecte rebot originat per les millores d'eficiència energètica a les llars.

A partir de les taules input-output de Catalunya de l'any 2005 i de les dades de consum sectorial d'electricitat, obtingudes dels balanços energètics, s'han calculat els coeficients d'arrossegament (F_j), els d'arrossegament relatiu (μ_j), els d'impuls (F_i^*) i els d'impuls relatiu (λ_i) del consum d'energia elèctrica, desenvolupats teòricament a l'apartat 6.1.2. La Taula 25 mostra els resultats obtinguts.

D'altra banda, la Taula 26 mostra l'ordenació dels sectors econòmics de major a menor coeficient d'arrossegament en el consum d'electricitat a Catalunya per al 2005, a partir de la classificació de les TIOC-05.

Taula 25. Coeficients d'arrossegament i d'impuls en el consum d'electricitat a Catalunya, 2005

Sector	Coeficients d'arrossegament (MWh/milers d'€)	Coeficients d'arrossegament relatiu	Coeficients d'impuls (MWh/milers d'€)	Coeficients d'impuls relatiu
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	0,193	0,485	0,160	0,401
Extracció i aglomeració de carbons	1,015	2,552	0,959	2,411
Extracció de petroli i gas	1,021	2,566	0,964	2,424
Combustibles nuclears i altres energies	0,039	0,098	0,000	0,001
Coqueries	0,018	0,046	0,000	0,000
Refineries de petroli	0,722	1,815	0,764	1,920
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	0,408	1,026	0,497	1,251
Fàbriques de gas - distribució de gas	0,114	0,287	0,125	0,315
Altres minerals (excepte de productes energètics)	0,528	1,326	0,560	1,408
Siderúrgia i fundició	1,553	3,905	1,654	4,158
Metal·lúrgia no fèrria	0,279	0,701	0,247	0,621
Vidre i productes de vidre	0,597	1,500	0,569	1,430
Ciment, calç i guixos	0,503	1,264	0,439	1,103
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	0,837	2,105	0,757	1,902
Química i petroquímica	0,375	0,943	0,510	1,282
Màquines i transformats metàl·lics	0,136	0,341	0,137	0,345
Construcció i reparació naval	0,110	0,277	0,024	0,061
Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	0,096	0,241	0,076	0,190
Construcció d'altres mitjans de transport	0,101	0,253	0,014	0,036
Alimentació, begudes i tabac	0,191	0,481	0,178	0,448
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	0,307	0,771	0,293	0,736
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	0,162	0,406	0,145	0,364
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	0,466	1,172	0,501	1,259
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	0,116	0,291	0,086	0,217
Productes de cautxú i productes plàstics	0,363	0,912	0,371	0,932
Treballs de construcció	0,059	0,149	0,017	0,042
Serveis de transport per ferrocarril	1,576	3,962	1,548	3,891
Altres empreses de transport	0,054	0,135	0,044	0,110
Hosteleria	0,167	0,421	0,126	0,317
Comerç i serveis	0,099	0,249	0,378	0,950
Administració i altres serveis públics	0,127	0,320	0,188	0,474

Font: elaboració pròpia a partir de les taules Input-output de Catalunya 2005 i dels balanços energètics del
Ministeri de d'Indústria, Turisme i comerç del Govern d'Espanya.

Taula 26. Classificació dels sectors econòmics de major a menor coeficient d'arrossegament en el consum d'electricitat a Catalunya 2005

	Producte	Coeficients d'arrossegament (MWh/milers d'€)	Coeficients d'arrossegament relatiu
1	Serveis de transport per ferrocarril	1,576	3,962
2	Siderúrgia i fundició	1,553	3,905
3	Extracció de petroli i gas	1,021	2,566
4	Extracció i aglomeració de carbons	1,015	2,552
5	Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	0,837	2,105
6	Refineries de petroli	0,722	1,815
7	Vidre i productes de vidre	0,597	1,500
8	Altres minerals (excepte de productes energètics)	0,528	1,326
9	Ciment, calç i guixos	0,503	1,264
10	Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	0,466	1,172
11	Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	0,408	1,026
12	Química i petroquímica	0,375	0,943
13	Productes de cautxú i productes plàstics	0,363	0,912
14	Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	0,307	0,771
15	Metal·lúrgia no fèrria	0,279	0,701
16	Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	0,193	0,485
17	Alimentació, begudes i tabac	0,191	0,481
18	Hosteleria	0,167	0,421
19	Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	0,162	0,406
20	Màquines i transformats metàl·lics	0,136	0,341
21	Administració i altres serveis públics	0,127	0,320
22	Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	0,116	0,291
23	Fàbriques de gas - distribució de gas	0,114	0,287
24	Construcció i reparació naval	0,110	0,277
25	Construcció d'altres mitjans de transport	0,101	0,253
26	Comerç i serveis	0,099	0,249
27	Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	0,096	0,241
28	Treballs de construcció	0,059	0,149
29	Altres empreses de transport	0,054	0,135
30	Combustibles nuclears i altres energies	0,039	0,098
31	Coqueries	0,018	0,046

Font: elaboració pròpia a partir de les TIOC-05 i dels balanços energètics del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

S'observa com el sector corresponent a "serveis de producció i distribució d'energia elèctrica" ocupa l'onzena posició dels 31 sectors econòmics en la classificació corresponent a la capacitat d'arrossegament dels sectors pel que fa al consum d'electricitat, el que implica que un increment del consum d'aquells sectors que estan situats per damunt provocaria un increment major del consum d'electricitat de tota l'economia i a la inversa per aquells que estan situats per sota.

Cal tenir en compte que la desagregació sectorial de les taules Input-output és determinant a l'hora d'obtenir els coeficients d'arrossegament, ja que una major desagregació resultaria en uns valors extrems majors.

8.3. Resultats de les simulacions

En aquest apartat es realitzen les simulacions dels escenaris extrems en el model desenvolupat en el capítol 6. En primer lloc, de la mateixa manera que en l'apartat anterior, es mostren els resultats en termes de canvis en els patrons de consum i en el consum total d'electricitat resultat d'incrementar l'eficiència en l'ús d'electricitat a les llars en un 10%. Posteriorment, es mostra l'efecte rebot en els escenaris considerats.

8.3.1. Millora de l'eficiència del 10%: nous patrons de consum i consum total d'electricitat

De la mateixa manera que en el capítol anterior, en aquest apartat s'ha aplicat el model, a mode d'exemple, per una millora de l'eficiència del 10% en els serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars a Catalunya. S'han obtingut uns nous patrons de consum i un nou consum total d'energia elèctrica que ha de realitzar tota l'economia.

*8.3.1.1. Nou patró de consum derivat de la millora d'eficiència energètica en
l'ús domèstic d'electricitat*

En aquest apartat es mostra el nou patró de consum final a les llars de Catalunya amb una millora de l'eficiència del 10% en l'electricitat a les llars pel cas dels escenaris extrems.

Els escenaris extrems també s'han simulat considerant un efecte rebot directe de l'electricitat a les llars del 36% per a l'electricitat a les llars a Catalunya. En aquest cas convé recordar, com s'ha indicat en el capítol anterior, que l'estalvi monetari en el sector corresponent al consum d'electricitat a les llars és de 33.534.360 € (Taula 27).

La mateixa taula també mostra el patró de consum final de les llars en els mateixos escenaris, però en aquest cas considerant un efecte rebot directe de l'electricitat a les llars a llarg termini del 49%. L'estalvi monetari en el sector corresponent al consum d'electricitat a les llars és de 26.722.690 €.

Taula 27. Patró de consum final de les llars a Catalunya segons escenari. Millora de l'eficiència en electricitat del 10%. Milers d'€ del 2005.

Producte	Elasticitat preu de la demanda a curt termini		Elasticitat preu de la demanda a llarg termini	
	Escenari pitjor	Escenari millor	Escenari pitjor	Escenari millor
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	364.245,50	364.245,50	364.245,50	364.245,50
Extracció i aglomeració de carbons	33,53	33,53	33,53	33,53
Extracció de petroli i gas	33,53	33,53	33,53	33,53
Combustibles nuclears i altres energies	220.573,59	220.573,59	220.573,59	220.573,59
Coqueries	75.490,98	109.025,33	75.490,98	102.213,66
Refineries de petroli	75.490,98	75.490,98	75.490,98	75.490,98
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	490.439,94	490.439,94	497.251,61	497.251,61
Fàbriques de gas - distribució de gas	122.887,40	122.887,40	122.887,40	122.887,40
Altres minerals (excepte de productes energètics)	5.962,10	5.962,10	5.962,10	5.962,10
Siderúrgia i fundició	44,93	44,93	44,93	44,93
Metal·lúrgia no fèrria	44,93	44,93	44,93	44,93
Vidre i productes de vidre	1.928,90	1.928,90	1.928,90	1.928,90
Ciment, calç i guixos	7.212,70	7.212,70	7.212,70	7.212,70
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	4.739,60	4.739,60	4.739,60	4.739,60
Química i petroquímica	353.585,18	353.585,18	353.585,18	353.585,18
Màquines i transformats metàl·lics	142.479,15	142.479,15	142.479,15	142.479,15
Construcció i reparació naval	23.511,45	23.511,45	23.511,45	23.511,45
Vehicles de motor, remolcs i semiremolcs	180.812,10	180.812,10	180.812,10	180.812,10
Construcció d'altres mitjans de transport	23.511,45	23.511,45	23.511,45	23.511,45
Alimentació, begudes i tabac	2.462.507,80	2.462.507,80	2.462.507,80	2.462.507,80
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	231.474,90	231.474,90	231.474,90	231.474,90
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	36.245,20	36.245,20	36.245,20	36.245,20
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	65.785,50	65.785,50	65.785,50	65.785,50
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	237.073,40	237.073,40	237.073,40	237.073,40
Productes de cautxú i productes plàstics	19.025,40	19.025,40	19.025,40	19.025,40
Treballs de construcció	844.766,50	844.766,50	844.766,50	844.766,50
Serveis de transport per ferrocarril	239.887,46	206.353,10	233.075,79	206.353,10
Altres empreses de transport	5.044.376,90	5.044.376,90	5.044.376,90	5.044.376,90
Hosteleria	18.075.780,20	18.075.780,20	18.075.780,20	18.075.780,20
Comerç i serveis	36.836.492,20	36.836.492,20	36.836.492,20	36.836.492,20
Administració i altres serveis públics	9.689.648,00	9.689.648,00	9.689.648,00	9.689.648,00
TOTAL	75.876.091,40	75.876.091,40	75.876.091,40	75.876.091,40

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05.

En l'escenari pitjor s'observa com incrementa el consum del sector "Serveis de transport per ferrocarril", mentre que en l'escenari millor només canvia el consum del sector "Coqueries", corresponents al primer i a l'últim sectors respectivament, en la classificació de sectors per coeficient d'arrossegament relatiu en el consum d'electricitat a Catalunya 2005 (veure Taula 26).

8.3.1.2. Consum total d'electricitat segons escenari, derivat de la millora d'eficiència

De la mateixa manera que el capítol anterior a continuació es mostren els resultats de les simulacions realitzades per als escenaris extrems després d'una millora del 10% de l'eficiència de l'electricitat a les llars a Catalunya, en termes de consum directe i indirecte d'energia elèctrica (Taula 28 i

Taula 29).

En aquest cas també es mostren els resultats pel cas d'un efecte rebot directe del consum d'electricitat a les llars del 36% a curt termini i del 49% a llarg termini, segons les estimacions realitzades en el capítol 4 del present treball.

Taula 28. Consum total d'electricitat segons escenaris. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. En MWh, 2005

Producte	Efecte rebot directe a curt termini		Efecte rebot directe a llarg termini	
	Escenari pitjor	Escenari millor	Escenari pitjor	Escenari millor
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	70.321,32	70.321,32	70.321,32	70.321,32
Extracció i aglomeració de carbons	34,05	34,05	34,05	34,05
Extracció de petroli i gas	34,23	34,23	34,23	34,23
Combustibles nuclears i altres energies	8.627,18	8.627,18	8.627,18	8.627,18
Coqueries	1.372,37	1.982,00	1.372,37	1.858,17
Refineries de petroli	54.493,96	54.493,96	54.493,96	54.493,96
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	200.095,43	200.095,43	202.874,53	202.874,53
Fàbriques de gas - distribució de gas	14.030,35	14.030,35	14.030,35	14.030,35
Altres minerals (excepte de productes energètics)	3.145,58	3.145,58	3.145,58	3.145,58
Siderúrgia i fundició	69,79	69,79	69,79	69,79
Metal·lúrgia no fèrria	12,54	12,54	12,54	12,54
Vidre i productes de vidre	1.150,72	1.150,72	1.150,72	1.150,72
Ciment, calç i guixos	3.626,89	3.626,89	3.626,89	3.626,89
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	3.968,86	3.968,86	3.968,86	3.968,86
Química i petroquímica	132.624,13	132.624,13	132.624,13	132.624,13
Màquines i transformats metàl·lics	19.320,20	19.320,20	19.320,20	19.320,20
Construcció i reparació naval	2.588,15	2.588,15	2.588,15	2.588,15
Vehícles de motor, remolcs i semiremolcs	17.357,08	17.357,08	17.357,08	17.357,08
Construcció d'altres mitjans de transport	2.363,83	2.363,83	2.363,83	2.363,83
Alimentació, begudes i tabac	471.264,12	471.264,12	471.264,12	471.264,12
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	71.004,42	71.004,42	71.004,42	71.004,42
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	5.858,42	5.858,42	5.858,42	5.858,42
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	30.676,10	30.676,10	30.676,10	30.676,10
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	27.464,18	27.464,18	27.464,18	27.464,18
Productes de cautxú i productes plàstics	6.901,72	6.901,72	6.901,72	6.901,72
Treballs de construcció	50.057,35	50.057,35	50.057,35	50.057,35
Serveis de transport per ferrocarril	378.066,05	325.215,43	367.330,77	325.215,43
Altres empreses de transport	270.764,16	270.764,16	270.764,16	270.764,16
Hosteleria	3.025.082,00	3.025.082,00	3.025.082,00	3.025.082,00
Comerç i serveis	3.652.990,69	3.652.990,69	3.652.990,69	3.652.990,69
Administració i altres serveis públics	1.233.629,30	1.233.629,30	1.233.629,30	1.233.629,30
TOTAL	9.758.995,18	9.706.754,19	9.751.039,00	9.709.409,46

Font: elaboració pròpia a partir de les TI0C-05.

Taula 29. Percentatge de variació del consum total d'electricitat als sectors econòmics ,segons escenari respecte l'escenari de inicial. Millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars del 10%. En MWh, 2005

Producte	Efecte rebot directe a curt termini		Efecte rebot directe a llarg termini	
	Escenari pitjor	Escenari millor	Escenari pitjor	Escenari millor
Productes de l'agricultura, la ramaderia, la caça, la silvicultura i de la pesca	0%	0%	0%	0%
Extracció i aglomeració de carbons	0%	0%	0%	0%
Extracció de petroli i gas	0%	0%	0%	0%
Combustibles nuclears i altres energies	0%	0%	0%	0%
Coqueries	0%	44,42%	0%	35,40%
Refineries de petroli	0%	0%	0%	0%
Serveis de producció i distribució d'energia elèctrica	-6,40%	-6,40%	-5,10%	-5,10%
Fàbriques de gas - distribució de gas	0%	0%	0%	0%
Altres minerals (excepte de productes energètics)	0%	0%	0%	0%
Siderúrgia i fundició	0%	0%	0%	0%
Metal·lúrgia no fèrria	0%	0%	0%	0%
Vidre i productes de vidre	0%	0%	0%	0%
Ciment, calç i guixos	0%	0%	0%	0%
Productes ceràmics, rajoles, maons, teules i productes de terra cuita per a la construcció	0%	0%	0%	0%
Química i petroquímica	0%	0%	0%	0%
Màquines i transformats metàl·lics	0%	0%	0%	0%
Construcció i reparació naval	0%	0%	0%	0%
Vehícles de motor, remolcs i semiremolcs	0%	0%	0%	0%
Construcció d'altres mitjans de transport	0%	0%	0%	0%
Alimentació, begudes i tabac	0%	0%	0%	0%
Ind. tèxtil, confecció, cuir i calçat	0%	0%	0%	0%
Fusta, suro i productes de fusta i suro (excepte mobles); articles de cistelleria i esparteria	0%	0%	0%	0%
Pasta de paper, paper i cartó i articles de paper i cartó	0%	0%	0%	0%
Productes de l'edició, productes impresos i material enregistrat	0%	0%	0%	0%
Productes de cautxú i productes plàstics	0%	0%	0%	0%
Treballs de construcció	0%	0%	0%	0%
Serveis de transport per ferrocarril	16,25%	0%	12,95%	0%
Altres empreses de transport	0%	0%	0%	0%
Hosteleria	0%	0%	0%	0%
Comerç i serveis	0%	0%	0%	0%
Administració i altres serveis públics	0%	0%	0%	0%
TOTAL	0,40%	-0,13%	0,32%	-0,11%

Font: elaboració pròpia a partir de les TIOC-05.

Taula 30. Variació del consum total d'electricitat en els escenaris extrems, davant una millora de l'eficiència energètica del 10% a les llars a Catalunya, 2005

Escenaris	Curt termini (Efecte rebot directe del 36%)	Llarg termini (Efecte rebot directe del 49%)
Referència		-4,071%
Pitjor	-2,28%	-1,81%
Millor	-2,6%	-2,07%

Font: elaboració pròpia a partir de les TIOC-05.

En la simulació dels escenaris extrems, que com s'ha comentat, són aquells que no són factibles de què succeeixin, però que resulten útils per a l'anàlisi estructural que es portarà a terme, s'observa com l'escenari "millor" suposa una reducció del consum d'electricitat, però que aquest és menor que en l'escenari de referència, pel que, fins i tot en aquest cas, hi hauria efecte rebot.

L'escenari "pitjor", tot i que suposa un increment del consum d'electricitat als sectors econòmics, és a dir, portaria a una situació de *backfire*, ja que tot l'estalvi monetari assolit per la millora de l'eficiència energètica es destinaria al sector amb major capacitat d'arrossegament de l'economia en temes d'energia elèctrica, tot i que al considerar l'estalvi energètic a les llars, l'efecte global quedaria en un efecte rebot menor.

8.3.2. Efecte rebot en els escenaris considerats

A continuació s'ha calculat l'efecte rebot directe i indirecte estàtic al que s'arribaria en les dues situacions extremes identificades amb els escenaris considerats. La Taula 31 mostra els resultats obtinguts.

Taula 31. Efecte rebot directe i indirecte estàtic estimats en els escenaris extrems

Escenaris	Curt termini	Llarg termini
	(Efecte rebot directe del 36%)	(Efecte rebot directe del 49%)
Pitjor	44,10%	55,45%
Millor	36,09%	49,07%

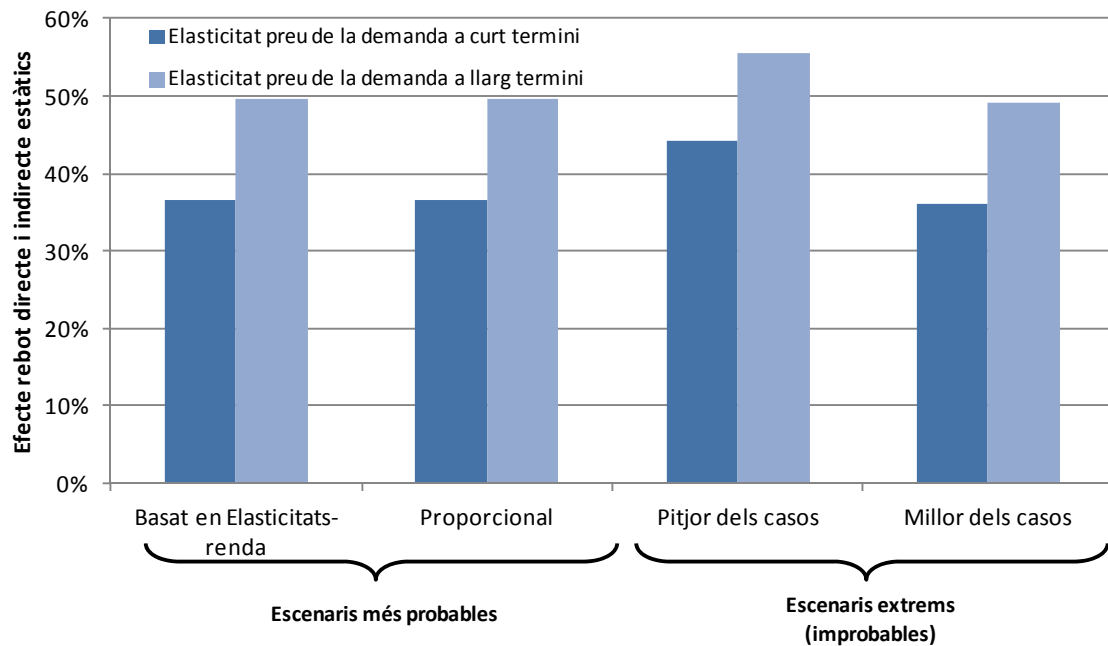
Font: elaboració pròpia a partir de les TIOC-05.

Els escenaris extrems mostren com en un cas on tots els estalvis monetaris de la millora de l'eficiència energètica es destinessin al sector amb un major coeficient d'arrossegament en termes d'electricitat es produiria un efecte rebot del 44,10% utilitzant els valors de les elasticitats preu de la demanda d'electricitat a curt termini i del 55,45% utilitzant els valors de les elasticitats preu de la demanda d'electricitat a llarg termini.

S'observa com en el millor dels casos, l'efecte rebot directe i indirecte estàtics és lleugerament superior a l'efecte rebot directe, mentre que en el pitjor dels casos es s'incrementaria, després de la millora d'eficiència de l'electricitat a les llars.

El Gràfic 16 mostra una comparativa entre tots els escenaris analitzats, tant els més probables, estimats en el capítol 7, com els escenaris extrems considerats en el present capítol.

Gràfic 16. Resultats de l'aplicació del model en els diferents escenaris, Catalunya 2005



Font: elaboració pròpia.

Per a Catalunya, i amb les hipòtesis considerades, els escenaris més probables proporcionarien uns efectes rebot propers al millor cas possible, tot i que superiors. També es pot observar com el potencial d'empitjorament de la situació és elevat, i que determinades circumstàncies que modifiquessin les reaccions dels patrons de consum davant millores de l'eficiència podrien incrementar l'efecte rebot.

8.4. Anàlisi estructural dels escenaris extrems

En aquest apartat s'ha realitzat una anàlisi estructural dels escenaris extrems. Com s'ha comentat, aquests escenaris no suposen una estimació realista del que succeiria a nivell macroeconòmic, tot i que sí que podrien succeir per a algun cas i àmbit concret, a nivell microeconòmic.

A més, és important tenir en compte que una desagregació major de les taules Input-

output utilitzades en el desenvolupament del model portarien a uns escenaris encara més extrems, mentre que una menor desagregació implicaria escenaris menys extrems. Per tant, aquests escenaris no s'han considerat útils a l'hora de proporcionar estimacions realistes de l'efecte rebot.

Tot i això, una anàlisi detallada dels resultats proporcionats pels models, en relació a aquests escenaris extrems, evidencia algunes qüestions clau, així com la possibilitat de realitzar una anàlisi més generalista, de les relacions entre l'efecte rebot i l'estructura productiva.

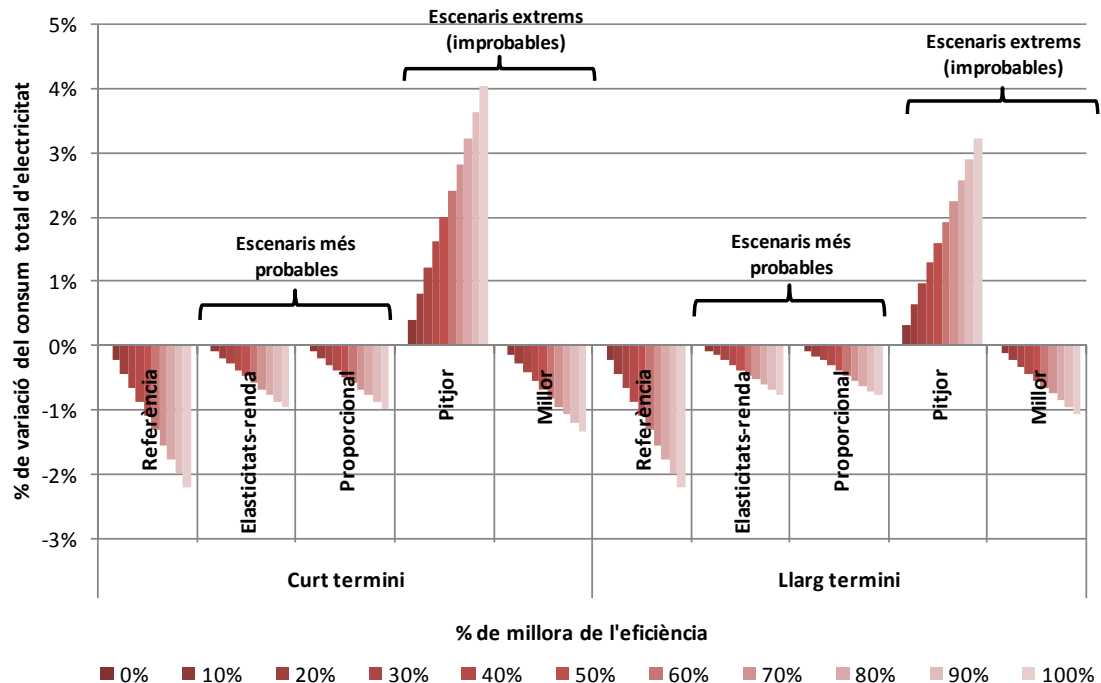
En aquest apartat es realitza, per una banda, una anàlisi estructural de les relacions entre l'efecte rebot i l'estructura productiva i, per altra, de les relacions entre l'efecte rebot directe i l'indirecte, que permeten aprofundir en l'enteniment de determinades qüestions, com pot ser la importància de l'entorn socioeconòmic en la determinació de l'efecte rebot.

8.4.1. Anàlisi estructural de les relacions entre efecte rebot i estructura productiva

En primer lloc s'ha realitzat una anàlisi de sensibilitat de l'efecte de diferents percentatges de millora de l'eficiència energètica sobre el consum total d'electricitat de l'economia, tant per als escenaris més probables com per als escenaris extrems.

A continuació es mostra la variació en el consum total d'electricitat de l'economia en els diferents escenaris, sota diferents percentatges de millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars.

Gràfic 17. Variació del consum total d'electricitat dels sectors econòmics a Catalunya, davant diferents percentatges de millora de l'eficiència de l'electricitat a les llars, 2005



Font: elaboració pròpia.

Si la millora d'eficiència de l'electricitat és molt elevada, s'obtenen uns millors resultats en l'escenari de referència (resultats inicialment esperats, sense considerar l'efecte rebot) i en els escenaris millor, el basat en elasticitats renda i el proporcional, ja que la reducció global del consum d'electricitat serà major. En canvi, en l'escenari pitjor es produiria un increment global del consum d'electricitat en els sectors econòmics.

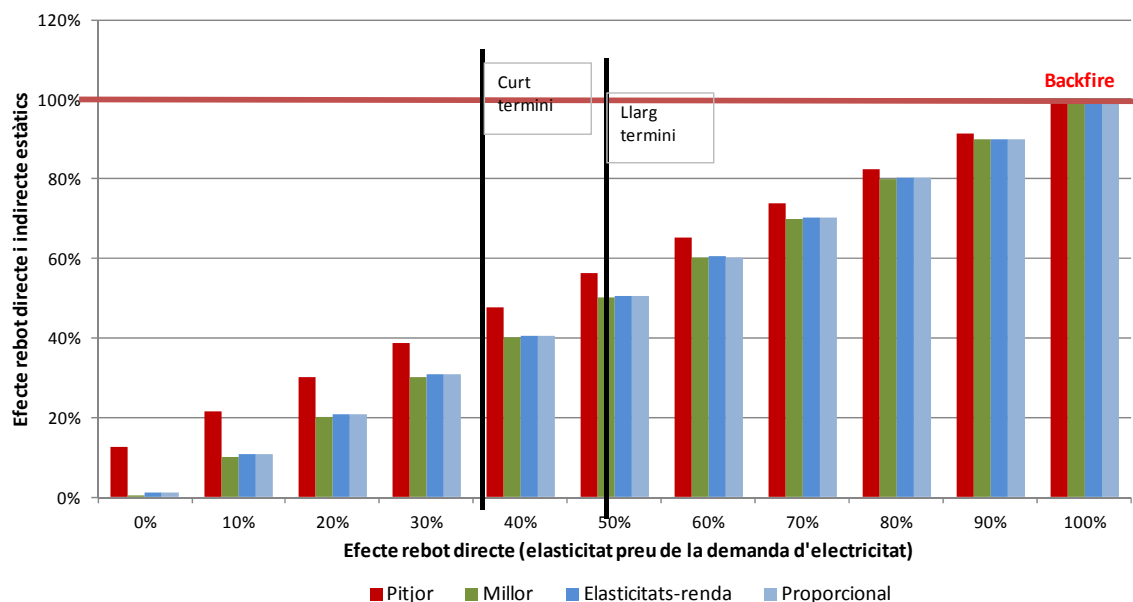
De manera genèrica, de l'aplicació del model s'extreu que com majors són les millores d'eficiència energètica, major és la variabilitat que s'obté en els resultats obtinguts en termes de consum total d'electricitat als sectors econòmics. Això és en funció de la nova distribució de la renda que es produeixi en el consum de béns i serveis sobre l'estructura econòmica en qüestió.

8.4.2. Anàlisi estructural de les relacions entre l'efecte rebot directe i l'efecte rebot indirecte

A continuació, s'ha realitzat una anàlisi de sensibilitat de l'efecte que tindrien diferents elasticitats preu de la demanda d'electricitat sobre l'efecte rebot directe i indirecte estàtics, per als diferents escenaris desenvolupats.

El Gràfic 18 mostra l'efecte rebot directe més l'indirecte estàtics del consum d'electricitat a Catalunya, en funció de l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat (és a dir, de efecte rebot directe, sota les hipòtesis descrites en el capítol 3) i de l'escenari *re-spending* que es contempli.

Gràfic 18. Efecte rebot directe i indirecte estàtics del consum d'electricitat a les llars en funció de l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat, Catalunya, 2005



Font: elaboració pròpia.

S'observa com l'efecte rebot directe i indirecte és més variable com menor sigui l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat, és a dir, l'efecte rebot directe, sota les

hipòtesis contemplades, podent arribar, en cas extrem d'una elasticitat igual a zero, a un efecte rebot total major que zero. Per a aquesta mateixa elasticitat, en el millor dels casos, l'efecte rebot total seria molt menor que l'efecte rebot directe, concretament, en el cas de l'economia catalana, del 0,15%.

Com s'ha indicat, malgrat que els escenaris extrems no serien realistes per a cap context macroeconòmic, la consideració d'aquestes conclusions pren rellevància quan es realitzen estimacions de l'efecte rebot directe en una economia determinada, ja que mostra com estimacions baixes de l'efecte rebot directe podrien conduir a un major efecte rebot directe i indirecte, en funció de l'estructura productiva, la tecnologia i l'estructura de consum sectorial d'energia elèctrica de l'economia sobre la qual es produeixi la millora.

Aquests resultats posen en entredit gran part de la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe per als serveis energètics a les llars, que considera que quan aquest no és significatiu (considerant uns valors més probables menors del 30%, en funció del servei energètic) no té efectes rellevants sobre el consum energètic i, per tant, no cal aplicar mesures correctores per a fer-hi front.

Encara que l'efecte rebot directe resulti menor, cal aplicar controls i mesures per a evitar que els estalvis monetaris derivats es destinin al consum de béns i serveis amb gran capacitat de consum indirecte d'energia elèctrica. La incertesa d'un efecte rebot directe baix és degut a les diferències d'intensitat energètica dels sectors sobre els quals s'incrementa la demanda final a les llars. D'altra banda, el consum energètic que realitza l'estructura econòmica incrementa molt a mesura que l'efecte rebot directe és baix, pel que afectaria considerablement l'estratègia de política energètica a portar a terme.

D'altra banda, a mesura que l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat s'aproxima a la unitat (efecte rebot directe proper al 100%), hi ha una menor incertesa, ja que hi ha menor estalvi monetari a destinar a altres béns i serveis i, per tant, l'efecte rebot directe més indirecte estàtics també tendeixen al 100%, sigui quin sigui l'escenari *re-spending*.

Aquests escenaris extrems també resulten importants a l'hora de prendre mesures de política fiscal, com ara impostos, per a fer front a l'efecte rebot, ja que la manera en què es realitzés la despesa pública procedent d'aquests impostos afectaria l'efecte rebot final en un sentit o en un altre. Això és degut a què aquesta anàlisi aplica a qualsevol font de despesa final sobre l'economia, no només la de les llars.

La linealitat en els resultats és deguda a les funcions de producció lineals que es troben implícites darrera de la modelització a partir de la metodologia Input-output. La convergència cap a un mateix efecte rebot directe més indirecte dels tres escenaris (concretament, cap a un efecte rebot del 100%) a mesura que s'incrementa l'elasticitat preu de la demanda d'electricitat a les llars (l'efecte rebot directe) és deguda al fet que a mesura que aquesta incrementa hi ha un menor estalvi monetari per a repartir en la resta de sectors econòmics, fent que l'efecte *re-spending* sigui menor, arribant a ser 0 en el cas hipotètic que l'efecte rebot directe fos del 100%.

Capítol 9

L'EFECTE REBOT I LES POLÍTIQUES D'EFICIÈNCIA ENERGÈTICA

9.1. Introducció

Les millores d'eficiència energètica han estat i són en molts països, una part clau de l'estratègia per a reduir el consum energètic i afrontar l'escalfament global. Aquest fet es fonamenta en la creença que una millora de l'eficiència energètica porta a un consum energètic menor i, com a conseqüència, a una reducció de l'emissió de gasos d'efecte hivernacle.

Els governs dediquen molts esforços en polítiques de millora de l'eficiència energètica nacional, tant al sector productiu com a les llars, com a part de la solució dels problemes energètics i ambientals. Tal i com s'ha mostrat al llarg de la present recerca, en última instància, aquests guanys de l'eficiència induïts en gran part pel progrés tecnològic han contribuït a potenciar el creixement econòmic més que a reduir el consum de recursos i les emissions de contaminants a l'atmosfera.

Com s'ha mostrat en aquest treball, el fet de promoure l'eficiència energètica sense mesures addicionals, no comporta necessàriament estalviar energia i reduir la contaminació (o, en qualsevol cas, les reduccions en el consum d'energia no són proporcionals a la millora d'eficiència). Cal incloure les mesures d'eficiència energètica en un context més ampli dins les polítiques energètiques que contempli una planificació acurada i mesures addicionals per a minimitzar l'efecte rebot. Això implica un finalitat i voluntat explícites de reduir el consum de recursos i les emissions contaminants quan s'apliquen mesures d'eficiència energètica.

L'efecte rebot és rarament tingut en compte en les anàlisis oficials sobre els estalvis energètics potencials de les millores en eficiència energètica tot i el recent interès d'alguns organismes com la Comissió Europea per a començar a considerar-lo i evitar-lo (Maxwell *et al.* 2011). Una excepció en la seva consideració és la política del Regne Unit

per a millorar l'aïllament tèrmic de les llars. En aquesta es contempla la possibilitat que alguns dels beneficis potencials de la mesura es tradueixin en majors temperatures internes, més que en reduir el consum energètic (DEFRA, 2007). Però l'efecte rebot directe és generalment ignorat, en la majoria d'ocasions per desconeixement, de la mateixa manera que també ho són els potencials efectes indirectes i sobre tota l'economia. Aquests efectes són més incerts, tot i que com mostra la present recerca, podrien arribar a ser de major magnitud que els directes.

Cal que es comenci a considerar de manera explícita l'efecte rebot a l'hora de realitzar polítiques de millora de l'eficiència energètica. El fet de no considerar-lo, a part de portar a polítiques energètiques inefectives en termes dels resultats assolits, implica un elevat cost d'oportunitat pel fet d'estar dedicant uns recursos públics a mesures que podrien estar produint efectes indesitjats. En aquest sentit, també caldria realitzar anàlisis *ex-post* de les polítiques per tal d'observar la seva efectivitat real.

La primera part de la recerca, dedicada a l'estimació de l'efecte rebot directe mostra com polítiques tecnològiques d'eficiència energètica que provoquen estimacions elevades de l'efecte rebot directe requereixen un control addicional sobre altres variables com els preus de l'energia, ja sigui a través de mesures de fiscalitat ambiental o altres que es mostraran a continuació.

En cas de no aplicar aquestes mesures addicionals, els estalvis potencials d'energia i d'emissions de carboni no es farien completament efectius. Encara que l'efecte rebot no resultés en *backfire*, l'aplicació de mesures de fiscalitat ambiental o de control d'altres variables permetria aprofitar al màxim els estalvis potencials derivats d'una millora de l'eficiència energètica; en cas contrari, la política perdria eficàcia com a mesura reductora del consum d'energia, i s'estarien malbaratant esforços.

Com es deriva de la segona part de la recerca portada a terme, sobre l'efecte rebot indirecte, encara que hi hagi un efecte rebot directe baix, l'efecte *re-spending* dels

estalvis monetaris assolits podria portar a un efecte rebot indirecte major. Per això, en aquests casos, també resulta important aplicar polítiques de control de l'efecte rebot que aprofitin al màxim les potencialitats d'una millora de l'eficiència energètica en un context de política energètica.

Caldria re-avaluar des d'aquesta perspectiva determinades polítiques i mesures que s'estan portant a terme en molts països per a millorar l'eficiència energètica. L'equació (19), que inclou els costos de capital del servei energètic en la formulació matemàtica de l'efecte rebot directe, mostra cap a on es podria dirigir l'efecte rebot a l'hora de portar a terme polítiques d'eficiència energètica sobre determinats serveis energètics, com per exemple, a partir de la subvenció d'aparells més eficients.

Com mostra l'equació, una part de l'efecte rebot es podria compensar si els nous aparells més eficients resulten més costosos, sempre i quan els consumidors assumissin la totalitat del cost del servei energètic. Una política de subvenció dels aparells més eficients que els faci més econòmics que els aparells ineficients podria, contràriament, amplificar l'efecte rebot. Aquesta és una mesura que ha estat molt utilitzada en països industrialitzats que volen millorar l'eficiència. A Espanya i a Catalunya s'han realitzat diversos plans de millora de l'eficiència que han subvencionat automòbils,¹⁶ electrodomèstics, calderes, aparells d'aire condicionat i finestres, entre d'altres (IDAE, 2007; IDAE, 2010). En l'últim pla ja s'ha considerat la possibilitat d'existència d'un efecte rebot, tot i que no s'ha considerat ni implementat cap mesura addicional que el pugui contrarestar.

La consideració de tots aquests aspectes porta cap a una reformulació de la política energètica. Calen mesures polítiques que la recolzin l'eficiència, però també calen mesures addicionals de control de l'efecte rebot. Per això s'ha d'establir un nou marc de política energètica que consideri tant les mesures tradicionals de millora de l'eficiència

¹⁶ On a més de l'eficiència s'han considerat aspectes relacionats amb la seguretat vial.

energètica com les mesures complementàries necessàries per a exercir un correcte control d'efectes secundaris indesitjats.

Per això és important avançar en la recerca teòrica i empírica sobre l'anàlisi i estimació de l'efecte rebot en tots els àmbits per a proporcionar millors arguments als decisors polítics, però alhora també en el disseny i la implementació d'aquells instruments econòmics, legislatius i polítics que, prenent en consideració aquest fenomen, permetin l'assoliment dels objectius desitjats en matèria de política energètica i ambiental.

En tota aquesta discussió cal tenir en compte que l'efecte rebot no ha de ser necessàriament un efecte advers. Si l'objectiu de la millora d'eficiència energètica és estrictament economicista, és a dir, el d'impulsar el creixement econòmic, l'efecte rebot passa a ser un resultat desitjable. Aquest deixa de ser-ho quan l'objectiu de la política d'eficiència és el reduir el consum d'energia, la contaminació o en la lluita contra el canvi climàtic tot i que no necessàriament les polítiques de control de l'efecte rebot van en contra del creixement econòmic. En aquest escenari és quan tenen sentit les polítiques addicionals de control de l'efecte rebot.

El present capítol, dedicat als principals instruments econòmics existents i a les propostes per a fer front a l'efecte rebot a les llars, s'estructura com es mostra a continuació: l'apartat 2 mostra les polítiques i instruments de diversa índole existents per al control de l'efecte rebot a les llars; l'apartat 3 mostra els principals instruments econòmics, així com una breu anàlisi d'un possible impost que compensés l'efecte rebot.

9.2. Polítiques de control de l'efecte rebot a les llars

L'efecte rebot no és més que la resposta que tenen els agents econòmics davant una reducció del cost en la provisió de determinats serveis energètics. Aquesta reducció del cost és deguda a una millora de la productivitat energètica dels serveis. Per tant, bona part de les polítiques per a controlar l'efecte rebot han d'anar orientades a modificar els comportaments dels agents econòmics davant la millora de l'eficiència.

El primer pas consistiria en el reconeixement de l'existència de l'efecte rebot i de la necessitat de la seva consideració a l'hora de definir els objectius de política energètica a assolir per una determinada política d'eficiència energètica. Els últims anys s'estàn realitzant passos en aquesta direcció, com ho mostra l'acceptació i interès per part d'organismes oficials com la Comissió Europea (Maxwell et al. 2011) i l'Agència Ambiental Europea (EEA, 2010), i a nivell espanyol, la seva menció en els *Plan de acción de ahorro y eficiencia energética 2011-2020* (IDAE, 2010) elaborat pel Govern d'Espanya, a diferència de l'anterior, on no es mencionava la seva possible existència (IDAE, 2007), tot i que, en la pràctica, no aplica possibles efectes rebot en els càlculs dels estalvis produïts pels plans anteriors.

El cas de les polítiques energètiques relacionades amb l'aïllament de les llars del Department of Energy and Climate Change (DECC) del Govern del Regne Unit és l'únic exemple conegut de com s'incorpora el possible efecte rebot directe en els efectes previstos d'una llei. En aquesta, el govern del Regne Unit inclou un 15% de reducció dels estalvis energètics esperats de les mesures d'aïllament a les llars per tal de comptabilitzar l'efecte rebot directe.

Addicionalment, el DECC va elaborar una guia (DECC, 2010) i un full de càlcul¹⁷ per a

¹⁷ Aquest pot ser descarregat de:

http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/about/ec_social_res/iag_guidance/iag_guidance.aspx

comptabilitzar l'efecte rebot en les polítiques per a reduir el consum d'energia.

D'altra banda, caldria establir definicions i mesures consistents dels efectes rebot i començar a introduir-los en tots els àmbits rellevants, com puguin ser les llars o les empreses, així com per a tots els serveis energètics dins d'aquests àmbits.

El no assoliment dels objectius en matèria d'eficiència energètica detectat pels decisors polítics està molt sovint associat a l'existència d'efecte rebot directe. L'efecte rebot indirecte sovint no és identificat en aquestes anàlisis, però com s'ha mostrat, encara redueix més l'efectivitat d'aquestes polítiques.

La incorporació d'anàlisi del cicle de vida en l'avaluació de la política ambiental proporcionaria una visió més acurada de fenòmens com l'efecte rebot, així com la possibilitat d'actuar en conseqüència. Com s'ha mostrat en capítols anteriors d'aquesta recerca, diferents patrons de consum comporten diferents continguts energètics, no sempre evidenciables a primer cop d'ull.

Tot i que existeix una escassa literatura sobre les mesures concretes per a contrarestar l'efecte rebot, principalment es poden identificar fins a tres grans categories de mesures (Ouyang *et al.*, 2010; Ehrhardt-Martinez i Laitner, 2010; Maxwell *et al.*, 2011). En primer lloc hi hauria aquelles destinades a modificar els comportaments dels consumidors a través de la informació i la conscienciació, en segon lloc els instruments normatius i en tercer lloc els instruments econòmics i de fiscalitat de l'energia.

9.2.1. Sensibilització, informació i comportament del consumidor

Per tal de contrarestar l'efecte rebot cal entendre el comportament humà i comptabilitzar de manera correcta els patrons de consum (DEFRA, 2007; UNEP, 2010; EEA, 2010).

Hi ha moltes vies per a realitzar sensibilització del consumidor i orientar les preferències dels consumidors per tal d'incentivar consums ambientalment desitjables. Una de les més utilitzades han estat les campanyes publicitàries realitzades per part dels governs per a modificar els comportaments i patrons de consum. Aquestes poden englobar-se en el que s'ha anomenat *People-Oriented initiatives* (Ehrhardt-Martinez i Laitner, 2008; Ehrhardt-Martinez i Laitner, 2010; Lutzenhiser, 2009; Meier 2009).

D'altra banda, també resulta interessant proporcionar major informació sobre el consum energètic a les llars i el seu cost, així com les seves variacions en emprendre determinades accions d'estalvi, d'aquesta manera es podria motivar les llars a reduir l'ús de l'energia (Dimitropoulos, 2009). En aquest sentit, Darby (2006) mostra com els comptadors intel·ligents poden influenciar el comportament i reduir el consum energètic. Wright *et al.* (2000) mostren com un millor *feedback* en les factures energètiques, és a dir, un major coneixement del consum i el cost energètic de les accions portades a terme a les llars, pot produir estalvis de fins al 10% en el consum elèctric per a calefacció en climes freds.

Històricament, però, en relació a l'energia i a les llars, la major part de les campanyes han anat destinades a l'adquisició d'aparells més eficients o directament a l'estalvi d'energia com a mesures de reducció del consum global d'energia, que com s'ha mostrat, no serien necessàriament efectives per sí soles.

Addicionalment, cal considerar les limitacions a l'hora d'aplicar mesures voluntàries. En aquest context tenen sentit arguments com la "Tirania de les petites decisions" (Odum, 1982), relacionat amb el resultat de moltes petites decisions, sovint irracionals, que acaben resultant en conclusions inesperades i/o indesitjables o la "Paradoxa de l'aïllament" (Sen, 1961), és a dir, per més que hi hagi instal·lat un comportament socialment altruista, sempre hi haurà algú que no ho serà, pel que es mantindran les repliques individualistes al llarg del temps.

A part, cal considerar altres dificultats addicionals a l'hora d'implantar mesures d'eficiència energètica, malgrat els avantatges en termes econòmics i ambientals que suposen. Això és conegut com la "Paradoxa de l'eficiència energètica" en la literatura.

Linares i Labandeira (2010), encara que reconeixen que les causes d'aquesta paradoxa no estan clares, i per tant no estan clares les polítiques que s'haurien de dur a terme, mostren com les possibles causes estarien, d'una banda en les fallades del mercat, i per una altra en la manca de consideració dels aspectes relacionats amb el comportament humà i social. En resum, aquests autors citen les següents causes:

- Preus baixos de l'energia: en aquest context, les inversions en mesures d'estalvi i eficiència no són rendibles. El problema és que els preus no acostumen a recollir els costos externs, tampoc quan estan regulats (i sovint estan subvencionats), mantenint-se artificialment baixos.
- Costos d'inversió més elevats del que s'esperava: en alguns casos s'ha observat que els costos resulten més elevats que els que s'esperava. A més, també hi ha costos "ocults" (menor nivell o qualitat del servei energètic).
- Incertesa i irreversibilitat de les inversions: les inversions en eficiència energètica, sovint resulten difícils de recuperar, si aquestes finalment resulten innecessàries o no rendibles. La incertesa dels preus energètics encara dificulta més les decisions d'inversió (Metcalf, 1994).
- Errors d'informació, que inclou informació asimètrica, imperfecta o miop.
- Racionalitat limitada. Fins i tot amb la millor informació disponible, els consumidors no poden (o no estan interessats) a realitzar tots els càlculs necessaris per prendre la millor decisió.

- Llentitud de la difusió tecnològica: Jaffe i Stavins (1994) van mostrar com els processos de difusió tecnològica són lents i en part és a causa de la incertesa i l'heterogeneïtat dels consumidors.
- Problema de l'agent-principal: aquest problema succeeix quan l'agent que paga la inversió no en rep els beneficis derivats. Per exemple, per a les inversions en aïllaments tèrmics de les llars, això passaria si l'inversor (propietari) no és el mateix que paga la factura d'electricitat (inquilí). Murtishaw i Sathaye (2006) van trobar com aquesta factor afectava al voltant d'un terç de la demanda residencial d'energia en els EUA.
- Imperfeccions dels mercats de capital: en determinats casos i particularment per a alguns segments de la població hi ha una dificultat d'accés a un adequat finançament d'aquest tipus de mesures.
- Heterogeneïtat dels consumidors: algunes mesures que per a determinats consumidors poden resultar rendibles, no ho són per altres, si no fan el mateix ús d'aquestes (Hausman, 1979).
- Divergència entre les taxes socials de descompte i les privades. Això també passa amb altres tipus d'inversions i faria que, tot i que socialment les mesures fossin molt beneficioses, no es consideressin així a nivell privat.

9.2.2. Instruments normatius

Com s'ha mostrat al llarg de la recerca realitzada, degut a l'existència de l'efecte rebot, no n'hi ha prou amb incentivar estalvi energètic o adquisició d'aparells més eficients, sinó que cal advertir i donar a conèixer dels possibles efectes perversos de redirigir els estalvis cap al consum de béns i productes intensius en el consum energètic directe i indirecte.

De manera conjunta amb la conscienciació, és important proporcionar la informació adequada i assegurar-se que els consumidors obtenen prou informació per a prendre decisions racionals. En aquest sentit, s'hauria de desenvolupar una normativa que persegueixi aquest objectiu.

Donat que no és l'objecte d'aquest treball, no es realitzarà un desenvolupament dels instruments normatius per a fer front l'efecte rebot. Resultaria però important que la normativa anés orientada, per una banda, a millorar la informació als consumidors i, per altra, a reduir les intensitats energètiques dels sectors econòmics mitjançant límits o prohibicions a la utilització i consum de recursos (Schneider, 2008) o a les emissions de contaminants (Sorrell, 2007), l'establiment d'objectius, etc.

Pel que fa a la informació, per exemple, i resultat de la recerca desenvolupada en relació als efectes *re-spending* sobre els patrons de consum de les llars, seria important que els Estats obliguessin a través de normativa específica, a realitzar una anàlisi del cicle de vida als productors en termes de consum d'energia dels seus productes i a etiquetar-los en conseqüència.

De la mateixa manera, seria important conèixer el destí dels productes financers d'estalvi i inversió, amb informació addicional sobre el consum energètic total d'aquests destins, per tal de prendre decisions amb una informació de major qualitat.

9.2.3. Instruments econòmics

Donades les característiques pròpies de l'efecte rebot, els instruments econòmics, i en particular els instruments de fiscalitat ambiental, poden jugar un paper clau a l'hora de modificar comportaments i contrarestar-lo.

Malgrat les dificultats d'establir una fiscalitat que compensi l'efecte rebot pel fet que, com s'ha mostrat, l'efecte rebot varia entre tecnologies, sectors i grups de renda, i encara que no es disposa d'estimacions de tots ells, s'ha de desenvolupar un marc fiscal adequat, que contempli i minimitzi l'efecte rebot a l'hora de portar a terme polítiques d'eficiència energètica.

El principal objectiu dels instruments de fiscalitat seria el d'incidir en els costos de proveir el treball útil dels diversos serveis energètics, incrementant el preu de l'energia, alhora que millora l'eficiència. D'aquesta manera, també es podria minimitzar l'efecte rebot a través d'una política de preus de l'energia.

Donada la seva importància per a evitar l'efecte rebot, l'apartat 9.3 desenvoluparà amb major profunditat aquests instruments, amb una breu anàlisi d'un impost que compensés l'efecte rebot, derivada de la recerca portada a terme en aquest treball.

9.3. Els instruments econòmics de control de l'efecte rebot

Com s'ha mencionat en l'apartat anterior, els instruments econòmics resulten clau per a contrarestar l'efecte rebot. Específicament, prenen especial rellevància els instruments de fiscalitat aplicada a l'energia.

L'efecte rebot s'ha definit com un increment del consum energètic davant d'una millora tecnològica que redueix el consum d'energia en l'obtenció de la mateixa quantitat de treball útil d'un servei energètic. Aquest increment del consum és degut a la reducció implícita que suposa per a l'usuari el cost del treball útil d'un servei energètic. És a dir, que es pot obtenir la mateixa quantitat de treball útil a un menor cost, encara que el preu de l'energia no variï a curt termini.

Cal tenir en compte que, en funció dels diferents objectius polítics, el millor no ha de ser necessàriament anular completament l'efecte rebot, això succeiria si per exemple, l'objectiu de la mesura d'eficiència fos el creixement econòmic. Sí que s'hauria de contrarestar totalment si es persegüís un objectiu de reducció del consum d'energia i les emissions a l'atmosfera.

9.3.1. Consideracions sobre fiscalitat per a adreçar l'efecte rebot directe

Centrats en l'efecte rebot directe, una imposició que contraresti completament l'efecte rebot seria aquella que compensaria la reducció de cost provocat per la millora d'eficiència energètica. És a dir, provocaria que el cost generalitzat del treball útil es mantingués constant.

En termes formals i tornant als desenvolupaments de capítols anteriors, a partir de l'equació (8) es té que el preu del servei energètic P_S és igual al preu de l'energia P_E entre l'eficiència energètica ε :

$$P_S = P_E / \varepsilon \quad (8)$$

En aquest cas, la imposició hauria de ser tal que compensés l'increment d'eficiència, és a dir, incrementant el preu del servei energètic. Per tant, essent t l'impost, després de la millora d'eficiència, s'hauria d'assolir l'objectiu de:

$$P_S = (P_E + t) / \varepsilon' \quad (106)$$

D'altra banda, l'equació (9) mostra el cost generalitzat del treball útil, que a nivell teòric seria el rellevant per a la presa de decisions d'un consumidor racional, com la suma de diversos components:

$$P_G = P_S + P_K + P_M + P_T \quad (9)$$

On P_G és el cost generalitzat del treball útil, P_K són els costos de capital anualitzats, P_M són els costos de manteniment i operatius, i P_T són els costos de temps. Aquest és el cost rellevant, és a dir, incorporant tots els costos que suposa la provisió del servei energètic.

Encara que la resta de components es mantinguin constants, la millora d'eficiència energètica suposa una reducció del cost del servei energètic i, per tant, del cost generalitzat del treball útil. Aquest és el cost a partir del qual els individus incrementarien el consum del propi servei energètic i/o veurien incrementada la seva renda disponible. A partir de l'equació (106):

$$t = \frac{P_E}{\varepsilon} \varepsilon' - P_E \quad (107)$$

En termes de cost generalitzat, a partir de l'equació (9), la tributació que compensaria completament l'efecte rebot quedaria de la següent manera:

$$t = \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} - 1 \right) P_E \quad (108)$$

D'aquesta manera, davant una millora de l'eficiència, la imposició s'incrementaria en funció de la proporció que suposa la nova eficiència energètica respecte l'anterior.

Des del punt de vista exclusivament de l'efecte rebot directe, la imposició que s'ha desenvolupat compensaria totalment l'efecte rebot directe, provocant una efectivitat màxima de les millores d'eficiència energètica. Això significaria una reducció del consum d'energia, i per tant, també del consum de recursos i de les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

D'altra banda, cal tenir en compte que aquest impost és de diferent naturalesa i podria no coincidir, sent menor o major, que un impost òptim pigouvià (Pigou, 1920), definit a partir de les externalitats ocasionades pel consum d'energia.

9.3.2. Consideracions sobre fiscalitat per a adreçar l'efecte rebot indirecte

Un desenvolupament, com el que s'ha mostrat en l'apartat anterior no té en compte determinats aspectes indirectes mostrats en aquesta recerca.

Els raonaments de fiscalitat per a l'efecte rebot directe serien certs considerant només la perspectiva del consumidor final (les llars) i els aspectes directes de l'efecte rebot. De la mateixa manera que s'ha fet en aquesta recerca per a l'avaluació empírica de l'efecte rebot, encara que no es tinguin en compte els efectes sobre tota l'economia (en termes *d'economy-wide effects*), cal una visió més àmplia de la problemàtica i observar que

succeiria amb els efectes indirectes.

Tornant al model desenvolupat per a captar els efectes *re-spending* de l'efecte rebot indirecte, el nou equilibri pressupostari es pot expressar com:

$$\sum_{i=1}^n (x_i p_i)' = y - (x_E p_E)' - s \quad (109)$$

L'objectiu de la imposició, per tal que no es modifiquin els patrons de consum de les llars, és aconseguir que la despesa en electricitat després de la millora d'eficiència energètica sigui la mateixa que la d'abans de la millora, però de manera que es redueixi la quantitat d'energia consumida. Per tant:

$$(x_E p_E)' = x_E (p_E + t) \quad (110)$$

Introduint aquesta imposició en el preu de l'energia, l'expressió (77) quedaria com:

$$\sum_{i=1}^n (x_i p_i)' = y - x_E (p_E + t) - s \quad (111)$$

D'aquesta manera no es produiria efecte *re-spending* a les llars, ja que la reducció de la despesa que realitzen aquestes sobre el sector energètic es veuria compensada per un impost sobre l'energia, que faria que els patrons de consum no es modifiquessin, i per tant, no es produïssin efectes indirectes.

Tanmateix, a continuació s'analitza un possible i addicional efecte *re-spending* que tindria la despesa pública que tindria lloc a partir dels ingressos obtinguts de la recaptació de l'impost.

9.3.3. L'efecte *re-spending* de la despesa pública

Com s'ha mostrat, la fiscalitat sobre l'energia pot ser una eina molt útil per a compensar la reducció del cost que suposa l'efecte rebot directe i, per tant, per a evitar possibles efectes *re-spending* que originarien un efecte rebot indirecte a les llars. Un aspecte, però, clau seria la manera en què s'administra la recaptació provinent de l'impost per a redreçar l'efecte rebot, ja que l'impost provocaria distorsions a l'economia, un nou efecte *re-spending* produït per la despesa pública i una transferència de renda de les llars cap al sector públic.

Aquesta nova despesa (o estalvi) del sector públic, generaria, de la mateixa manera que succeeix a les llars, un efecte *re-spending* que podria acabar produint un efecte rebot indirecte que podria ser major o menor que l'efecte *re-spending* produït a les llars.

Aquest fet constata la impossibilitat d'eliminar completament l'efecte rebot directe i indirecte estàtics, ja que com s'ha mostrat en la simulació dels escenaris extrems, encara que hi hagués informació perfecta i l'Estat destinés de manera intencionada tota la recaptació de l'impost al sector amb un menor coeficient d'arrossegament, es produiria cert efecte rebot.

Per a minimitzar l'efecte rebot, es podria analitzar la possibilitat de què l'Estat configurés l'impost com a finalista, la recaptació del qual es podria destinar a subvencionar els sectors (o a les empreses dins dels diferents sectors) amb un menor coeficient d'arrossegament en termes de consum d'energia. Tot i que caldria anar amb compte a l'hora d'implementar una mesura d'aquest tipus, ja que podria provocar distorsions en l'economia, increment d'altres impactes ambientals, modificació de la tipologia d'energia utilitzada, etc. Aquests i molts d'altres factors haurien de ser considerats amb major profunditat abans d'implementar una mesura com aquesta.

També es podria instrumentalitzar com un sistema dinàmic que incentivés els sectors productius a reduir les seves intensitats energètiques. Aquest sistema generaria un incentiu continu a la millora. En aquest cas seria un incentiu a la millora de les intensitats energètiques a través de les compres que realitzen de béns intermedis.

Malgrat la idoneïtat teòrica d'un sistema d'aquest tipus en termes de reducció de l'efecte rebot i del consum energètic global, aquest presentaria problemes en termes redistributius, ja que podria suposar una transferència de renda de les llars cap a les empreses. Per a tenir en compte i evitar aquest aspecte en la mesura del possible, una mesura d'aquest tipus podria anar acompanyada de canvis en la imposició directa a les llars, així com canvis en la fiscalitat directa a les empreses, com podria ser una modificació de l'impost de societats.

D'altra banda, els impostos creen altres distorsions, pel que resulta molt difícil dissenyar un impost que de manera efectiva contraresti la reducció del cost del servei energètic que suposa una millora de l'eficiència energètica en un àmbit concret.

En tot cas, la manera de mitigar l'efecte rebot i els instruments més adequats per a fer-ho, incloent-hi els instruments fiscals, constitueix tota una línia de recerca en la qual encara queda molt per a explorar, ja que gairebé no hi ha literatura científica sobre la temàtica.

Capítol 10

CONCLUSIONS I FUTURES LÍNIES DE RECERCA

10.1. Principals mancances i futures línies de recerca

Les principals mancances de la recerca realitzada sobre l'efecte rebot directe són:

- La falta de dades sobre variables per a la consideració de més elements en les estimacions, sobretot dades d'eficiència energètica i de treball útil dels serveis energètics, que haguessin permès estimacions més exactes de l'efecte rebot directe, sense l'estimació indirecta per la via de l'estimació d'elasticitats preu de la demanda d'energia.
- Derivada de l'anterior, la incertesa sobre la validesa de les hipòtesis de simetria i endogeneïtat de l'eficiència energètica en les estimacions realitzades i com aquestes poden haver afectat als resultats obtinguts.
- La falta de sèries més llargues per a arribar a resultats més concloents, especialment pel que fa a les estimacions de l'efecte rebot directe per a refrigeració domèstica.
- La manca de referents per a analitzar amb major detall les implicacions polítiques dels resultats obtinguts.

Caldria en posteriors recerques ampliar i millorar les estimacions de l'efecte rebot, i aprofundir en les implicacions polítiques dels resultats obtinguts, analitzant instruments i mecanismes de control específics de l'efecte rebot coherents amb les polítiques d'eficiència energètica portades a terme.

Caldria, així mateix, millorar les hipòtesis realitzades pel que fa al comportament de les llars a l'hora de prendre decisions de consum. Per tal d'obtenir millors aproximacions a

l'efecte rebot directe i indirecte estàtics és necessari obtenir escenaris *re-spending* que s'ajustin a la realitat de l'economia objecte d'anàlisi. Això podria realitzar-se a través de l'estimació de models AIDS, realitzant estimacions de les elasticitats renda/creuades entre el preu dels serveis energètics (o directament la millora de l'eficiència energètica, en cas d'haver-hi dades disponibles) i la demanda de la resta de béns i serveis de l'economia. La falta de suficients dades o de la seva correspondència amb les dades de la comptabilitat regional fa que no sigui possible una anàlisi d'aquest tipus per a Catalunya.

A nivell teòric també caldria desenvolupar amb major profunditat i modelitzar el paper de l'estalvi en el model, així com el comportament de les decisions entre estalvi i inversió, i les seves conseqüències, tant a nivell microeconòmic com macroeconòmic.

D'altra banda, aquesta anàlisi permet diverses extensions, no només pel que fa la complexitat dels models en el relaxament d'hipòtesis i la incorporació de supòsits més realistes, sinó també pel que fa a la consideració de diferents àmbits i nivells d'anàlisi. Així, per exemple, es poden desenvolupar models que contemplin els efectes de les millores d'eficiència energètica a les llars sobre el consum d'altres fonts energètiques, com el gas natural o el petroli, considerant la possibilitat d'un possible "efecte rebot creuat" entre fonts energètiques.

També es podria considerar com es trasllada l'efecte rebot d'una economia a una altra a través del desenvolupament de models input-output multiregionals (MRIO). Això es podria realitzar anàlogament a les anàlisis realitzades en el capítol 7, a través del comerç internacional i la variació produïda de les exportacions netes, com a conseqüència d'una millora en l'eficiència energètica a les llars.

També es podria considerar que les millores de l'eficiència energètica, i l'efecte rebot, es fessin extensives a l'àmbit de les empreses, desenvolupant models que consideressin els efectes dins de contextos de competència imperfecta.

Per a disposar d'una visió més completa de l'efecte rebot, caldria considerar els efectes dinàmics sobre el creixement econòmic d'una millora de la productivitat de l'energia i, més enllà, els canvis qualitatius en les estructures socioeconòmiques i culturals.

Cal avançar en la recerca en l'àmbit de les polítiques per a fer front a l'efecte rebot, però per a què aquestes polítiques resultin efectives cal un coneixement més precís de la magnitud de l'efecte rebot en tots els àmbits i de les fonts que originen els diferents tipus d'efecte rebot.

10.2. Conclusions

L'efecte rebot és diferent per cada ús final d'energia i per cada sector de l'economia, i la resposta a nivell microeconòmic és diferent que la que es produeix a nivell macroeconòmic. L'efecte rebot també pot variar entre països, en funció del període d'anàlisi, dels costos energètics, la demanda dels serveis energètics, la tecnologia, els grups de renda i altres factors. Alguns estudis apunten que és considerablement major en països en desenvolupament que en països més industrialitzats, degut a la major llunyania dels seus consums actuals en la majoria de serveis energètics, respecte dels nivells òptims de confort, entre altres.

Els resultats obtinguts en les estimacions de l'efecte rebot directe sobre el conjunt de serveis energètics domèstics resulten similars als obtinguts en altres treballs empírics realitzats per a altres àmbits geogràfics. L'únic treball que es té constància que havia estimat de manera explícita l'efecte rebot per a un conjunt de serveis energètics a les llars (incloent il·luminació i aparells electrònics) és el de Guertin *et al.* (2003), en el que es va trobar un efecte rebot d'entre el 32% i el 49% a llarg termini. Pel que fa a la refrigeració domèstica, els dos estudis dels quals es té constància són Hausman (1979) i Dubin *et al.* (1986), fets per als EUA, i que proporcionen unes estimacions de l'efecte rebot inferiors als resultats obtinguts per a Catalunya –entre el 0% i el 50%—. D'altra banda, Fernández

(2006) i Labandeira *et al.* (2010) van estimar elasticitats preu de la demanda residencial de l'electricitat a Espanya, sense considerar explícitament l'efecte rebot, trobant, uns valors de -0,51 i de -0,25 respectivament, el que suposaria un efecte rebot del 51% o del 25% sota les hipòtesis mencionades.

Una de les principals dificultats per a l'estimació de l'efecte rebot és la falta de les dades necessàries per a portar-la a terme, que fa que en molts casos s'hagin de realitzar aproximacions a través de variables *proxy*, així com la correcta especificació dels models estimats. Sota determinades hipòtesis es pot demostrar com l'efecte rebot directe equival a l'elasticitat preu de la demanda d'energia, per a un servei energètic. Un altre problema deriva dels atributs del servei energètic, ja que l'efecte rebot directe es tradueix, en part, en una millora (modificació) d'aquests atributs, fent que resulti molt difícil la seva quantificació real ja que aquests es traduirien en una millora del benestar dels usuaris, sense incrementar el consum energètic ni la demanda del servei. D'altra banda, la saturació o efecte "saciació" resulta clau en l'efecte rebot directe, ja que com més allunyat s'estigui d'aquest, més elevat resultarà l'efecte rebot directe, ja que els usuaris es trobaran més allunyats del seu nivell de confort i, per tant, demandaran més del servei energètic quan es produeixi l'abaratiment que suposa una millora de l'eficiència energètica.

L'anàlisi realitzada per a l'efecte rebot directe i indirecte estàtic a les llars estaria en consonància amb els estudis existents sobre anàlisi del cicle de vida a partir d'una anàlisi input-output, ja que s'analitza, en un marc estàtic d'equilibri general, l'energia necessària d'un nou patró de consum obtingut a partir de les millores d'eficiència energètica a les llars.

Els models mostren com, per a un efecte rebot directe baix, els efectes rebot indirectes tenen un rang de possibilitats ampli que caldria analitzar amb major profunditat en cada context econòmic. Per a efectes rebot directe elevats, els rangs de possibilitats es reduirien, no produint-se pràcticament estalvi energètic, però tampoc *backfire* extrem, i

la suma d'ambdós tipus d'efecte rebot convergiria al 100% com major fos l'efecte rebot directe.

Cal tenir en compte que els casos extrems reflecteixen el potencial efecte rebot directe més indirecte de l'economia en consideració, tot i que seria improbable que es produïssin a nivell agregat. No obstant, proporcionen el potencial efecte rebot donada una estructura econòmica, tant en el seu límit inferior com superior. Malgrat la improbabilitat dels escenaris extrems a nivell macroeconòmic, aquests podrien donar-se en un àmbit concret a nivell microeconòmic.

Una de les principals aportacions de la present recerca és la necessitat d'actuar davant d'un efecte rebot directe, encara que, a priori, aquest resulti insignificant. Com s'ha mostrat a Catalunya amb la determinació de l'escenari més probable, no seria d'esperar un efecte rebot directe i indirecte que portés a una situació de *backfire*. L'existència, però, dels escenaris extrems posaria en dubte el fet de descartar, sense realitzar anàlisis addicionals, possibles efectes perjudicials sobre el consum de recursos i emissions a l'atmosfera quan s'obtenen estimacions baixes de l'efecte rebot directe.

Aquests escenaris extrems tenen implicacions per les polítiques energètiques destinades a fer front a l'efecte rebot, ja que una política fiscal destinada a l'apropiació dels estalvis monetaris derivats de la millora d'eficiència podria comportar un efecte *re-spending* addicional, provocat per la recaptació del sector públic. A més, s'observa en el cas de Catalunya com, encara que l'administració destinés tota la recaptació a aquell sector amb menor coeficient d'arrossegament en termes d'energia, es produiria un efecte rebot directe i indirecte. En aquest sentit, caldria una anàlisi per a determinar el destí dels recursos econòmics alliberats per la millora de l'eficiència energètica.

D'altra banda, si es produeix una millora de l'eficiència en l'ús de l'electricitat a les llars també seria raonable pensar que es produirien millores similars a les empreses i es traslladarien per tant al teixit productiu, provocant efectes sobre els costos i preus dels

inputs que afectarien tota l'estructura econòmica. Aquesta recerca, però, ha aïllat les millores d'eficiència a les llars, considerant que l'estructura productiva roman constant.

L'únic estudi similar que calcula l'efecte rebot directe i indirecte a partir de modelització input-output i un model *re-spending* és el de Druckman *et al.* (2010), però a diferència del present estudi, en aquell es calcula l'efecte rebot derivat de canvis en els patrons de consum voluntàriament adoptats per les llars, mentre que en aquest, la variació dels patrons de consum és induït per una millora de l'eficiència en l'ús de l'electricitat a les llars. El citat estudi trobà uns resultats per a l'efecte rebot directe més indirecte d'entre el 12% i el 512%, per als casos extrems, amb uns resultats més probables del 34%, similars als trobats en la present recerca.

Cal un reconsideració profunda de les polítiques energètiques orientades a reduir el consum de recursos i afrontar l'escalfament global. Com s'ha mostrat, les polítiques de millora de l'eficiència energètica, per ser efectives, han d'anar acompanyades de polítiques efectives de comunicació i conscienciació de la ciutadania, d'instruments normatius i/o d'una fiscalitat adequada, que maximitzi l'efectivitat de la política minimitzant l'efecte rebot, i d'aquesta manera el màxim possible dels estalvis potencials d'una millora de l'eficiència es transformin en reals.

Un impost per a minimitzar l'efecte rebot seria aquell que incrementa el cost del servei energètic a través d'un increment del preu de l'energia que aquest utilitza, de tal manera que la reducció del cost que suposa la millora d'eficiència es vegi compensada per aquest increment del preu. D'aquesta manera s'aconsegueix que no s'incrementi la demanda del servei energètic i, per tant, es redueix el consum d'energia tant com estava previst que ho fes. Malgrat les dificultats d'establir una fiscalitat adequada, la utilització d'aquests instruments pot compensar l'efecte rebot i fer més efectives les mesures d'eficiència energètica.

A més a més, una política fiscal destinada a fer front a l'efecte rebot a les llars, com un

impost indirecte que compensés la reducció del cost que suposa una millora d'eficiència a les llars, a part de la corresponent política de despesa, hauria d'anar acompanyada d'una política industrial que impulsés els sectors productius a reduir el seu consum directe i indirecte d'energia.

Una correcta combinació de diversos instruments podria minimitzar l'efecte rebot indirecte a les llars, ja que si s'aconsegueix que no es produeixi estalvi monetari a les llars no hi haurà ni un major consum ni canviaran els patrons de consum a causa de la millora d'eficiència. També cal incorporar l'efecte rebot en les anàlisis *ex-post* de les polítiques d'eficiència energètica, així com incorporar-lo en els models i programes governamentals.

Des d'una visió més àmplia, la discussió essencial de la problemàtica és qüestionar-se si les millores d'eficiència energètica són, en darrer terme, utilitzades per a reduir el consum de recursos, i per tant les pressions exercides sobre el medi ambient, o bé, si aquestes són utilitzades per a créixer econòmicament, amb el que presumiblement s'estarien incrementant les pressions sobre el medi ambient.

En el cas que no es produeixi efecte rebot, les millores d'eficiència energètica són netament utilitzades per a reduir el consum de recursos. Si l'efecte rebot, tal i com ha estat definit, és menor del 100%, hi haurà una part de la millora d'eficiència utilitzada per a reduir l'ús de recursos i una altra per a créixer econòmicament. Aquesta part utilitzada per a créixer però podria arribar a compensar l'altra part a través dels efectes que té el creixement econòmic sobre l'ús de recursos. Finalment, si l'efecte rebot és major del 100%, produint-se *backfire*, s'estaria utilitzant tota la millora d'eficiència per a créixer econòmicament, en major o menor mesura.

En aquest context, si es persegueix un objectiu mediambiental de reducció de les pressions sobre el medi i de lluita contra el canvi climàtic, caldria un replantejament a fons del paper de les polítiques d'estalvi i eficiència energètica que porten a terme les diverses administracions públiques.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Al-Ali, H. M. (1979). *Input-output analysis of energy requirements: an application to the Scottish economy in 1973*. Energy Economics 1, 211-218.
- Albino, V., Dietzenbacher, E. i S. Kühtz (2003). *Analyzing materials and energy flows in an industrial district using an enterprise Input-output model*. Economic System Research 15, 457-480.
- Alcántara, V. (1995). Economía y contaminación atmosférica: hacia un nuevo enfoque desde el análisis Input-output. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona.
- Alcántara, V. i E. Padilla (2003). *“Key” sectors in final energy consumption: an input-output application to the Spanish case*. Energy Policy 31, 1673-1678.
- Alcántara, V. i J. Roca (1995). *Energy and CO2 emissions in Spain. Methodology of analysis and some results for 1980-90*, Energy Economics 17(3), 221-230.
- Alfredsson, E. C. (2004). *'Green' consumption - no solution for climate change*. Energy 29, 513-24.
- Allan, G., N. Hanley, P. G. McGregor, J. Kim Swales i K. Turner (2006). *The macroeconomic rebound effect and the UK economy*. Final report to the Department Of Environment Food and Rural Affairs, Department Economics, University of Strathclyde, Strathclyde.
- Angel Economic Reports and Applied Econometrics (1984). *Survey of Conditional Energy Demand Models for Estimating Residential Unit Energy Consumption Coefficients*. EPRI EA-3410. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Arrow, K. J. i G. Debreu (1954). *Existence of an equilibrium for a competitive economy*. Econometrica 22, 265-290.
- Ayres, R.U. i A.V. Kneese (1969). *Pollution, Consumption, and Externalities*. American Economic Review 59, 282-296.
- Barker, T., P. Ekins i T. Foxon, (2007). *Macroeconomic effects of efficiency policies for*

energyintensive industries: the case of the UK Climate Change Agreements, 2000-2010. Energy Economics 29(5), 760-78.

Barker, T. i T. Foxon, (2006). *The macroeconomic rebound effect and the UK economy.* Report to the Department of the Environment, food and Rural Affairs, 4CMR, Cambridge.

Becker, G. S. (1965). *A theory of the allocation of time.* The Economic Journal, LXXV (299), 493–517.

Berkhout, P. H., Muskens, J. C. i J. W. Velthuijsen (2000). *Defining the rebound effect.* Energy Policy 28, 425–432.

Berry, S. R., Salmon, P. i G. Heal (1978). *On a relation between economic and thermodynamic optima.* Resources and energy 1, 123-137.

Besen, S. M. i L. Johnson (1982). *Comment on economic implications of mandated efficiency standards for household appliances.* Energy Journal 3(1), 110–116.

Bezdek, R. i B. Hannon (1974). *Energy, manpower, and highway trust fund.* Science 185(4152), 669-675.

Binswanger, M. (2001). *Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?* Ecological Economics 36 (1), 119–132.

Blair, P. (1979). "Multiobjective regional energy planning". Boston MA: Martinus Nijhoff.

Blair, P. (1980). *Hierarchies and priorities in regional energy planning.* Regional Science and Urban Economics 1387-405.

Blair, P. i A. Wyckoff (1989). *The changing structure of the U.S. economy: an Input-output analysis*, a: Miller, R. E., Polenske, K. R. i A. Z. Rose (eds.), "Frontiers of Input-output analysis". Oxford University Press, New York, pp. 293-307.

Blair, R. D., D. L. Kaserman i R. C. Tepel (1984). *The impact of improved mileage on gasoline consumption.* Economic Inquiry, XXII, 209–17.

Boardman, B. i G. Milne (2000). *Making cold homes warmer: the effect of energy efficiency improvements in low-income homes,* Energy Policy 218 (6-7), 411-24.

- Bourque, P. (1981). *Embodied energy trade balances among regions*. International Regional Science Review 6, 121-136.
- Brännlund, R., Ghalwash, T., i J. Nordström (2007). *Increased Energy Intensity and the Rebound Effect: Effects on Consumption and Emissions*. Energy Economics 29(1), 1-17.
- Brookes, L. G. (1978). *Energy policy, the energy price fallacy and the role of nuclear energy in the U.K.* Energy Policy 6, 94-106.
- Brookes, L. G. (1979). *A Low Energy Strategy for the UK*, per G. Leach et al.: *a Review and Reply*. Atom 269, 3-8.
- Brookes, L. G. (1990). *The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution*. Energy Policy 18(2), 199-201.
- Brookes, L. G. (1992). *Energy efficiency and economic fallacies - a reply*. Energy Policy 20(5), 390-92.
- Brookes, L. G., (1993). *Energy efficiency fallacies – the debate concluded*. Energy Policy 21(4), 346-47.
- Brookes, L. G. (2000). *Energy efficiency fallacies revisited*. Energy Policy 28(6-7), 355-66.
- Bullard, C. W. i R. A. Herendeen (1975). *The energy cost of goods and services*. Energy Policy 3(4), 268-278.
- Cardenete, A., Sancho, F., Gual, M.A., Fuentes, P. (2008). *Análisis del “efecto rebote” del sector energético español a través de un modelo de equilibrio general aplicado*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Ministerio de Industria, Turismo y comercio. Gobierno de España.
- Carlsson-Kanyama, A., Engstrom, R. i R. Kok (2005). *Indirect and direct energy requirements of city households in Sweden*. Journal of Industrial Ecology 9(1-2), 221-236.
- Casals, X. G. (2006). *Analysis of building energy regulation and certification in Europe: their role, limitations and differences*. Energy and Buildings 38, 381-92.
- Casler, S. (2001). *Interaction terms and structural decomposition: an application to the*

defense cost of oil, a: Michael, L. L. i E. Dietzenbacher (eds.), Input-output analysis: frontiers and extensions, New York, pp. 143-160.

Casler, S. i B. Hannon (1989). *Readjustment potentials in industrial energy efficiency and structure*. Journal of Environmental Economics and Management 17, 93-108.

Casler, S. i S. Wilbur (1984). *Energy input-output analysis, a simple guide*. Resources and Energy 6, 187–201.

Chalkley, A. M., Billett, E. i D. Harrison (2001). *An investigation of the possible extent of the Re-spending Rebound Effect in the sphere of consumer products*. The Journal of Sustainable Product Design 1(3), 163-170.

Chapman, P. (1974). *Energy costs: a review of methods*. Energy Policy 2 (2), 91–103.

Chapman, P., Leach, G i M. Slessor (1974). *The energy cost of fuels*. Energy Policy 2(3), 231-243.

Chen, C. Y. i A. Rose (1990). *A structural decomposition analysis of changes in energy demand in Taiwan: 1971-1984*. Energy Journal 11(1), 127-146.

Chen, C. Y. i R. H. Wu (1994). *Sources of changes in industrial electricity use in the Taiwan economy, 1976-86*. Energy Economics 16(2), 115-120.

Christensen, L. R., Jorgenson, D. W. i L. J. Lau (1975). *Transcendental Logarithmic Utility Functions*. American Economic Review 65, 367-83.

Cohen, C., Lenzen, M. i R. Schaeffer (2005). *Energy requirements of households in Brazil*. Energy Policy 33, 555–562.

Costanza, R. (1980). *Embodied energy and economic evaluation*. Science 210(4475), 1219-1224.

Costanza, R. i R. A. Herendeen (1984). *Embodied energy and economic value in the United States economy: 1963, 1967 and 1972*. Resources and Energy 6, 129-163.

CSIRO (2005). *A triple bottom line analysis of the a ustralian economy, Volume 1*. Commonwealth of Australia.

- Cuijpers, C. (1995). *A joint model of household space heat production and consumption: empirical evidence from a Belgian micro-data survey*. A: *the Twenty-First Century: Harmonizing Energy Policy, Environment and Sustainable Economic Growth*, Proceedings of 18th IAEE International Conference. Washington DC, July 5–8.
- Cuijpers, C. (1996). *An empirical investigation into the economics of house heating*. Public Economics Research, Paper Number 50., Centrum Voor Economische Studien, Leuven, Belgium.
- Cumberland, J.H. (1966). *A regional Interindustry model for analysis of development objectives*. Papers of the regional science association, 17, 65-94.
- Dahl, C. (1993). *A survey of energy demand elasticities in support of the development of the NEMS*. Preparat pel US Department of Energy, Contract No. De-AP01-93EI23499, Department of Mineral Economics, Colorado School of Mines, Colorado.
- Daly, H. (1968). *On Economics As a Life Science*. Journal of Political Economy 76, 392–406.
- Darby, S. (2006). *The effectiveness of feedback on energy consumption. A Review of Defra of the literature on metering, billing and direct displays*. University of Oxford.
- Deaton, A. i J. Muellbauer (1980). *An Almost Ideal Demand System*. The American Economic Review 70 (3), 312-326.
- Dargay, J. M. (1992). *Are price & income elasticities of demand constant? The UK experience*. Oxford Institute for Energy Studies, Oxford, U.K.
- Dargay, J. M. i D. Gately (1994). *Oil demand in the industrialised countries*. Energy Journal, 15 (Special Issue) 39–67.
- Dargay, J. M. i D. Gately (1995). *The imperfect price irreversibility of non-transportation of all demand in the OECD*. Energy Economics 17 (1), 59–71.
- Davis, L. W. (2007). *Durable goods and residential demand for energy and water: evidence from a field trial*, Working Paper, Department of Economics, University of Michigan.
- DECC (2010). *Valuation of energy use and greenhouse gas emissions for appraisal and*

evaluation. Department of Energy and Climate Change. UK Government.

DEFRA (2007). *Consultation document: energy, cost and carbon savings for the draft EEC 2008 - 11 illustrative mix*, Department of Environment, Food and Rural Affairs, London.

Denton, R. V. (1975). *The energy cost of goods and services in the Federal Republic of Germany*. Energy Policy 3(4), 279-284.

Departament de Treball i Indústria (2006). *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015*. Generalitat de Catalunya.

Department of Trade and Industry (2007). *Energy consumption in the United Kingdom*, Department of Trade and Industry, London.

Dietzenbacher, E. i J. Sage (2006). *Mixing oil and water? Using Hybrid Input-output tables in a structural decomposition analysis*. Economic systems research 18, 85-95.

Dimitropoulos, J. i S. Sorrell (2006). *The Rebound effect: Microeconomic Definitions, Extensions and Limitations*. Proceedings of the 29th IAEE International Conference, Potsdam, Germany.

Dimitropoulos, J. (2007). *Energy productivity improvements and the rebound effect: An overview of the state of knowledge*. Energy Policy 35(12), 6354-6363.

Dimitropoulos, J. (2009). *Energy Consumption, Behaviour Change and the Rebound Effect*. Behaviour change for a more sustainable London. London Sustainability Exchange. September 10, 2009.

Dinan, T.M. (1987). *An Analysis of the Impact of Residential Retrofit on Indoor Temperature Choice*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.

Douthitt, R. A. (1989). *An economic analysis of the demand for residential space heating fuel in Canada*. Energy 14 (4), 187-97.

Druckman, A., Chitnis, M., Sorrell, S. i T. Jackson (2010). *An investigation into the rebound and backfire effects from abatement actions by UK households*. Working Paper Series 05-10, University of Surrey.

Dubin, J. A., Miedema, A. K. i R. V. Chandran (1986). *Price effects of energy-efficient technologies: a study of residential demand for heating and cooling*. Rand Journal of Economics 17(3), 310–325.

Dufournaud, C.M., Quinn, J.T. i J.J. Harrington (1994). *An applied general equilibrium (AGE) analysis of a policy designed to reduce the household consumption of wood in the Sudan*. Resource and Energy Economics 16, 69-90.

EEA (2010). "The European environment - state and outlook 2010: consumption and the environment". European Environment Agency, Copenhagen, November 2010.

Ehrhardt-Martinez, K., i J. A. "Skip" Laitner (2008). *The Size of the U.S. Energy Efficiency Market: Generating a More Complete Picture*. Washington, DC: American Council for a More Energy-Efficient Economy.

Ehrhardt-Martinez, K. i J. A. "Skip" Laitner (2010). *Rebound, Technology and People: Mitigating the Rebound Effect with Energy-Resource Management and People-Centered Initiatives*. 2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.

Einhorn, M. (1982). *Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances: an extension*. Energy Journal 3(1), 103–109.

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

Eto, J., Kito, S., Shown, L. i R. Sonnenblich (1995). *Where did the money go? The cost and performance of the largest commercial sector DSM programs*. LBNL-38201, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

Eto, J., Vine, E., Shown, L., Sonnenblich, R. i C. Payne (1994). *The cost and performance of utility lighting programs*. LBNL-34967, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

Feist, W. (1996). Life-cycle energy balances compared: low energy house, passive house, selfsufficient house. Proceedings of the International Symposium of CIB W67, Vienna, Austria.

- Fernández, L. (2006). *Análisis microeconómico de la demanda eléctrica residencial de corto plazo en España*. Grupo de Investigación en Políticas Públicas y Regulación Económica. Dept. de Política Económica UB.
- Folk, H. i B. Hannon (1973). *An energy, pollution, and employment policy model*. A: "Energy: Demand, Conservation, and Institutional Problems". Cambridge, MA, USA, Massachusetts Institute of Technology.
- Fouquet, R. i P. Pearson (2006). *Seven centuries of energy service: the price and use of light in the United Kingdom (1300–2000)*. The Energy Journal 27(1), 139–176.
- Freire-González, J. (2010). *Empirical evidence of direct rebound effect in Catalonia*. Energy Policy 38 (5), 2309–2314.
- Freire-González, J. (2011a). *Methods to empirically estimate direct and indirect rebound effect of energy-saving technological changes in households*. Ecological Modelling 223 (1), 32-40.
- Freire-González, J. (2011b). *The effects of energy-saving technological change on energy consumption: assessing the rebound effect*. Proceedings: Advances in Energy Studies 2010. Can we break the addiction to fossil energy? 7th Biennial International Workshop Advances in energy studies 2010.
- Fronzel, M. (2004). *Empirical assessment of energy price policies: the case for cross price elasticities*. Energy Policy 32, 989-1000.
- Fronzel, M., J. Peters i C. Vance (2007). *Identifying the rebound: issues and empirical evidence from a German household panel*. RWI Discussion Papers No. 57 Essen.
- Fronzel, M. i C. M. Schmidt (2005). *Evaluating Environmental Programs: The Perspective of Modern Evaluation Research*. Ecological Economics 55(4), 515-26.
- Gately, D. (1990). *The US demand for highway travel and motor fuel*. Energy Journal 11, 59–73.
- Gately, D. (1992). *Imperfect price reversed ability of US gasoline demand: asymmetric responses to price increases and declines*. Energy Journal 13 (4), 179–207.

- Gately, D. (1993). *The imperfect price reversibility of world oil demand*, Energy Journal 14 (4), 163–82.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). “The entropy law and the economic process”. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Giljum, S. i K. Hubacek (2004). *Alternative approaches of physical Input-output analysis to estimate primary material inputs of production and consumption activities*. Economic Systems Research 16, 301-310.
- Gilliland, M. W. (1975). *Energy Analysis and Public Policy*. Science 189, 1051-1056.
- Glomsrød, S. i W. Taojuan (2005). *Coal cleaning: a viable strategy for reduced carbon emissions and improved environment in China?* Energy Policy 33, 525-542.
- Gowdy, J. M. i J. L. Miller (1987). *Technological and demand change in energy use: an input-output analysis*. Environment and Planning 19(10), 1387-1398.
- Greene, D.L. (1992). *Vehicle use and fuel economy: how big is the rebound effect?* Energy Journal 13, 117–143.
- Greene, D.L., Kahn, J. i R. C. Gibson (1998). *Estimating the rebound effect for household vehicles in the U.S.* Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Greene, D.L., Kahn, J. i R. C. Gibson (1999a). *An Econometric Analysis of the Elasticity of Vehicle Travel with Respect to Fuel Cost per Mile using the RTEC Survey Data*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Greene, D.L., Kahn, J.R. i R. C. Gibson (1999b). *Fuel economy rebound effect for US household vehicles*. Energy Journal 20(3), 1–31.
- Greening, L. A. i D. L. Greene (1998). *Energy use, technical efficiency, and the rebound effect: a review of the literature*. Informe al U.S. Department of Energy. Hagler Bailly and Co., Denver.
- Greening, L. A., Greene, D. L. i C. Difiglio (2000). *Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey*. Energy Policy 28, 389–401.

- Grepperud, S. i I. Rasmussen (2004). *A general equilibrium assessment of rebound effects*. Energy Economics 26(2), 261–282.
- Griffin, J. (1976). *Energy Input-output modelling*. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, November.
- Grubb, M. J. (1995). *Asymmetrical price elasticities of energy demand*, a “Global warming and energy demand”. T. Barker, P. Ekins i N. Johnstone eds, Routledge, London and New York.
- Guerra, A. I. (2009). A general equilibrium assessment of the “rebound effect”: the Spanish case. Tesi Doctoral. Departament d’Economia Aplicada. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Guertin, C., Kumbhakar, S., i A. Duraiappah (2003). *Determining Demand for Energy Services: Investigating income-driven behaviours*. International Institute for Sustainable Development.
- Haas, R. i P. Biermayr (2000). *The rebound effect for space heating—Empirical evidence from Austria*. Energy Policy 28(6–7): 403–410.
- Haas, R. i L. Schipper (1998). *Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements*. Energy Economics 20 (4), 421–42.
- Han, X. i T. K. Lakshmanan (1994). *Structural changes and energy consumption in the Japanese economy 1975-85: an Input-output analysis*. The energy Journal 15, 165-188.
- Hanley, N.D., McGregor, P.G., Swales, J.K. i K.R. Turner (2006). *The impact of a stimulus to energy efficiency on the economy and the environment: a regional computable general equilibrium analysis*. Renewable Energy 31, 161-171.
- Hanly, M., Dargay, J. i P. Goodwin (2002). *Review of income and price elasticities in the demand for road traffic*. ESRC Transport Studies Unit, University College London.
- Hannon, B. (1973). *An energy standard of value*. Annals of the American Academy for Political and Social Sciences 410, 139-153.

- Hannon, B i F. Puleo (1974). "Transferring from urban cars to buses: the energy and employment impacts". CAC Document No. 98, Center for Advanced Computation, University of Illinois, Urbana, IL, USA.
- Hannon, B., Stein, R. G., Segal, B. Z. i D. Serber (1978). *Energy and labor in the construction sector*. Science 202, 837-847.
- Hartman, R. S. (1988). *Self-selection bias in the evaluation of voluntary energy conservation programs*. The Review of Economics and Statistics 70(3), 448–58.
- Haughton, J. i S. Sarkar (1996). *Gasoline tax as a corrective tax: estimates for the United States, 1970-1991*. The Energy Journal 17(2), 103–126.
- Hausman, J. A. (1979). *Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables*. Bell Journal of Economics 10(1), 33–54.
- Henly, J., Ruderman, H. i M.D. Levine (1988). *Energy savings resulting from the adoption of more efficient appliances: a follow-up*. Energy Journal 9(2), 163–170.
- Henry, E. W. (1977). *An Input-output approach to cost-benefit analysis of energy conservation methods*. Economic and Social Review 9, 1-26.
- Herendeen, R. (1974). *Affluence and energy demand*. Mechanical Engineering 96, 18-22.
- Herendeen, R. (1978). *Total energy cost of household consumption in Norway, 1973*. Energy 3, 615-630.
- Herendeen, R., Ford, C. i B. Hannon (1981). *Energy cost of living, 1972-1973*. Energy 6, 1433-1450.
- Herendeen, R. i R. L. Plant (1981). *Energy analysis of four geothermal technologies*. Energy 6, 73-82.
- Herendeen, R i A. Sebald (1975). *Energy, employment and dollar impacts of certain consumer options*, a: Williams, RH (ed.): "The Energy Conservation Papers". Ballinger Publishing Company, Cambridge MA, USA, 131-170.
- Herendeen, R. i J. Tanak (1976). *The energy cost of living*. Energy 1(2), 165–78.

- Herring, H. (1999). *Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences*. Applied Energy 63, 209–226.
- Herring, H. (2006). *Energy efficiency—a critical view*. Energy 31(1), 10–20.
- Hertwich, E. (2005). *Lifecycle approaches to sustainable consumption: A critical review*. Environmental Science & Technology 39 (13), 4673-4684.
- Hirst, E. (1987). *Changes in indoor after retrofit based on electricity billing and weather data*. Energy Systems Policy 10, 1–20.
- Hogan, W. W. i D. W. Jorgenson (1991). *Productivity trends and the cost of reducing CO2 emissions*, The Energy Journal 12(1), 67-85.
- Hong, S. H., Oreszczyn, T. i I. Ridley (2006). *The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings*. Energy and Buildings 38 (10), 1171–1181.
- Hsueh, L. i L. J. Gerner (1993). *Effect of thermal improvements in housing on residential energy demand*, Journal of Consumer Affairs 27(1), 87-105.
- IDAE (2007). “Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España”. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- IDAE (2010). “Plan de acción de ahorro y eficiencia energética 2011-2020”. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- Institut d’Estadística de Catalunya (Idescat) (2007). “Les Taules Input-output de Catalunya 2001”. Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007*. IPCC Fourth Assessment Report (AR4).
- Isakson, H. R. (1983). *Residential space heating: an analysis of energy conservation*. Energy Economics 5, 49–57.
- Isard, W. (1968). *On the linkage of socio-economic and ecologic system*. Papers of the Regional Science Association 21, 79-99.
- Isard, W., Chogull, C.L. Kissin J., Seyfarth, R.R. Tatlock, R. Bassett, K.E. Furtado J.G. i R.M.

- Izumita (1972). "Ecologic Economic Analysis for Regional Development". London, Collier, Macmillan.
- Jaffe, A.B. i Stavins, R.N. (1994). *The energy paradox and the diffusion of conservation technology*. Resource and Energy Economics 16, 91–122.
- Jalas, M. (2002). *A time use perspective on the materials intensity of consumption*. Ecological Economics 41(1), 109–123.
- James, D. E., Musgrove, A. R. D. i K. J. Stocks (1986). *Integration of an economic input-output model and a linear programming technological model for energy systems analysis*. Energy Economics (April), 99-112.
- Jevons, W. S. (1865). "The Coal Question". London: Macmillan and Co.
- Jones, C.T. (1993). *Another look at US passenger vehicle use and the rebound effect from improved fuel efficiency*. Energy Journal 14, 99–110.
- Jorgenson, D. W. (1984). *The role of energy in productivity growth*. The Energy Journal 5(3).
- Jorgenson, D. W. i B. Fraumeni (1981). *Relative prices and technical change*. A: Berndt, E., Field, B.C. (Eds.), Modelling and Measuring Natural Resource Substitution. MIT Press, Cambridge, MA.
- Jorgenson D. W. i L. J. Lau (1975). *The Structure of Consumer Preferences*. Annals of Economic and Social Measurement 4, 49-101.
- Jorgenson, D. W. i K. J. Stiroh (2000). *U.S. economic growth at the industry level*. American Economic Review, papers and proceedings of the American Economic Association, 90, 161-167.
- Junankar, S., Lofsnaes O. i P. Summerton (2007). *MDM-E3: a short technical description*. Working Paper, Cambridge Econometrics.
- Juster, F. T. i F. P. Stafford (1991). *The allocation of time: empirical findings, behavioural models and problems of measurement*. Journal of Economic Literature 29(2), 471–522.

Kagawa, S. i H. Inamura (2004). *A structural decomposition of energy consumption based on a Hybrid rectangular Input-output framework: Japan's case*. Economic Systems Research 13, 339-363.

Kaufmann, R. K. i I. G. Azary-Lee (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*, Proceedings of a Workshop held in St Paul, Minnesota, April 2-6.

Khazzoom, J. D. (1980). *Economic Implications of Mandated Efficiency Standards for Household Appliances*. Energy Journal 1, 21–39.

Khazzoom, J. D. (1982). *Response to Besen and Johnson's comment on economic implications of mandated efficiency standards for household appliances*. Energy Journal 3(1), 117–124.

Khazzoom, J. D. (1986). *An Econometric Model Integrating Conservation in the Estimation of the Residential Demand for Electricity*. JAI Press, Greenwich, CT.

Khazzoom, J. D. (1987). *Energy savings from the adoption of more efficient appliances*. Energy Journal 8(4), 85–89.

Khazzoom, J. D. (1989). *Energy savings from more efficient appliances: a rejoinder*. Energy Journal 10(1), 157–165.

Khazzoom, J. D. i S. Miller (1982). *Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances: response to Besen and Johnson's comments*. Energy Journal 3(1), 117–124.

Kok, R., R. M. J. Benders, i H. C. Moll (2006). *Measuring the environmental load of household consumption using some methods based on input–output energy analysis: A comparison of methods and a discussion of results*. Energy Policy 34(17), 2744–61.

Koopmans, C. (1997). *NEMO: CPB's energy model*. Den Haag, CPB Report 1997/2.

Kouris, G. (1982). *Elasticities - science or fiction?* Energy Economics 3(2), 66–70.

- Kratena, K. i S. Schleicher (1999). *Impact of carbon dioxide emissions reduction on the Austrian economy*. Economic Systems Research 11, 245-261.
- Labandeira, X., J. M. Labeaga i X. López-Otero (2010). *Estimation of Elasticity Price of Electricity with Incomplete Information*. WP 01/2010. Economics for energy.
- Leach, G., Lewis, C., Romig, F., van Buren, A. i G. Foley (1979). "A low-energy strategy for the United Kingdom". Science Reviews Ltd., Austria: International Institute for Environment and Development.
- Lenzen, M. (1998). *Energy and greenhouse gas cost of living for Australia during 1993/94*. Energy 23(66), 497-516.
- Lenzen, M., Pade, L. i J. Munksgaard (2004). *CO₂ multipliers in multi-region Input-output models*. Economic Systems Research 16, 391-412.
- Leontief, W. (1936). *Quantitative Input-output relations in the economic system of the United States*. Review of economics and statistics 18:105-125.
- Leontief, W. (1941). *The Structure of American Economy 1919-1939*, New York, Oxford.
- Leontief, W. (1970). *Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input–Output Approach*. Review of Economics and Statistics 52, 262–271.
- Leontief, W., Chenery, H. B., Clark, P. G., Dusenberry, J. S., Ferguson, A. R., Grosse, A. P. , Grosse, R. N., Holzman, M., Isard, W. i H. Kistin (1953). *Studies in the Structure of the American Economy: Theoretical and Empirical Explorations in Input-output Analysis*, New York, Oxford University Press.
- Leontief, W. i D. Ford (1971). *Air Pollution and the Economic Structure: Empirical Results of Input–Output Calculations*. Fifth International Conference on Input–output Techniques, Geneva, Switzerland, North Holland Pub. Co.
- Leung, P. S. i M. H. Vesenska (1987). *Forecasting a state-specific demand for highway fuels*. Energy Syst. Policy 10, 167–188.
- Lin, X. i K. R. Polenske (1995). *Input-output anatomy of China's energy use changes in the*

1980s. *Economic Systems Research* 7(1), 67-84.

Linares, P. i X., Labandeira (2010). *Energy efficiency: economics and policy*. *Journal of Economic Surveys* 24 (3), 573–592.

Lovins, A. B. (1977). “Soft Energy Paths: Toward a durable peace”. Penguin Books.

Lovins, A. B. (1998). *Further comments on Red Herrings*. Carta a the New Scientist, Nº 2.152, 18 September.

Lovins, A. B., J. Henly, H. Ruderman, i M. D. Levine, (1988). *Energy saving resulting from the adoption of more efficient appliances: another view; a follow-up*. *The Energy Journal* 9(2), 155.

Lutzenhiser, L. (2009). *Behavioral Assumptions Underlying California Residential Sector Energy Efficiency Programs*. Preparat per a: CIEE Behavior and Energy Program. Oakland, CA: CIEE.

Margarit, J.; Vilalta, Ll. i M. Escobar (2003). “Els graus dia de calefacció i refrigeració de Catalunya. Institut Català d’Energia”. Departament de Treball, Indústria, Comerç i Turisme. Generalitat de Catalunya.

Mayo, J. W. i J. E. Mathis (1988). *The Effectiveness of Mandatory Fuel Efficiency Standards in Reducing the Demand for Gasoline*. *Applied Economics* 20 (2), 211–19.

Maxwell, D., Owen, P., McAndrew. L, Muehmel, K. i A., Neubauer (2011). *Addressing the Rebound Effect*. European Commission DG Environment.

Meier, A. (2009). *How one city cut its electricity use over 30% in six weeks*. Proceedings of the European Council for an Energy-Efficient Economy Summer Study.

Metcalf, G.E. (1994). Economics and rational conservation policy. *Energy Policy* 22, 819–825.

Miller, E. M. (1986). *Cross-sectional and time-series biases in factor demand studies: explaining energy-capital complementarity*. *Southern Economic Journal* 52(3), 745-62.

Miller, R.E i P.D. Blair (2009). “Input-output analysis: foundations and extensions”, 2nd

edition. Cambridge University Press, New York.

Murtishaw, S. i Sathaye, J. (2006). *Quantifying the effect of the principal-agent problem on US residential energy use*. LBNL-59773 Rev.

Nadel, S. M. (1993). *The takeback effect: fact or fiction?* Proceedings of the 1993 Energy Program Evaluation Conference, Chicago, Illinois, 556–566.

Nesbakken, R. (2001). *Energy consumption for space heating: a discrete-continuous approach*. Scandinavian Journal of Economics 103(1), 165-84.

Nishimura, K., Hondo, H. i Y. Uchiyama (1996). *Derivation of energy-embodiment functions to estimate the embodied energy from the material content*. Energy 21(12), 1247-1256.

Odum, W. (1982). *Environmental degradation and the tyranny of small decisions*. BioScience 32 (9), 728-729.

Ouyang J, Long, E. i Hokao, K. (2010). *Rebound effect in Chinese household energy efficiency and solution for mitigating it*. Energy 35 (12), 5269-5276.

Pachauri, S. (2004). *An analysis of cross-sectional variations in total household energy requirements in India using micro survey data*. Energy Policy 32 (15), 1723–1735.

Pajuelo, A. (1980). *Equilibrio general versus análisis parcial en el análisis input-output económico ambiental: una aplicación al análisis de la contaminación atmosférica en España*. Revista del Instituto de Estudios Económicos, 3.

Parti, M., i C. Parti (1980). *The total and appliance specific conditional demand for electricity in the household sector*. The Bell Journal of Economics, 11 (1), 309–21.

Patterson, M. G. (1996). *What is energy efficiency: concepts, indicators and methodological issues*. Energy Policy 24 (5), 377–90.

Peet, J. (1993). *Input-output methods of energy analysis*. International Journal of Global Energy Issues 5(1), 10-18.

Penner, P. S., Herendeen, R. A. i T. Milke (1979). *New hybrid 1971 energy intensities*

available. Energy 4, 469-473.

Pick, H. J. i P. E. Becker (1975). *Direct and indirect uses of energy and materials in engineering and construction*. Applied Energy 1, 31-51.

Pigou, A. C. (1920). "The economics of welfare". Macmillan, London.

Pilati, D. A. (1976). *Energy analysis of electricity supply and energy conservation options*, Energy 2, 1-7.

Polimeni, J. M., Mayumi, K. i M. Giampietro (2008). The Jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements. Earthscan, London.

Pollack, R. A. i M. L. Wachter (1975). *The relevance of the household production function and its implications for the allocation of time*. Journal of Political Economy 83 (2), 255-77.

Proops, J. L. R. (1984). *Modelling the energy-output ratio*. Energy Economics 6(1), 47-51.

Proops, J. L. R. (1988). *Energy intensities, input-output analysis and economic development*, a: "Input-Output Analysis: current developments", Ciascini.

Quigley, J. i D. Rubinfeld (1989). *Unobservables in consumer choice: residential energy and the demand for comfort*. Review of Economics and Statistics 70, 416-425.

Rasmussen, P. N. (1956). Studies in Intersectoral Relation. North Holland, Amsterdam.

Reinders, A. H. M. E., Vringer, K. i K. Blok (2003). *The direct and indirect energy requirements of households in the European Union*. Energy Policy 31, 139-153.

Richmond, A. K. i R. K. Kaufmann (2006). *Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions?* Ecological Economics 56(2), 176-89.

Rogers, D. W. O. (1980). *Energy resource requirements of a solar heating system*. Energy 5, 75-86.

Rose, A. i C. Y. Chen (1991). *Sources of change in energy use in the U.S. economy 1972-82*. Resources and Energy 13, 1-21.

- Roy, J. (2000). *The rebound effect: some empirical evidence from India*. Energy Policy 28(6-7), 433-438.
- Royal Commission on Environmental Pollution (2007). *The Urban Environment*, London.
- Sanders, M. i M. Phillipson (2006). *Review of differences between measured and theoretical energy savings for insulation measures*. Centre for Research on Indoor Climate and Health, Glasgow Caledonian University, Glasgow.
- Sanne, C. (2000). *Dealing with environmental savings in a dynamical economy –how to stop chasing your tail in the pursuit of sustainability*. Energy Policy 28, 487-495.
- Sartori, I. i A. G. Hestnes (2007). *Energy use in the life-cycle of conventional and low-energy buildings: a review article*. Energy and Buildings 39, 249–57.
- Saunders, H. (1992). *The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth*. Energy Journal 13 (4), 131–148.
- Saunders, H. D. (2007). *Fuel conserving (and using) production function*. Working Paper, Decision Processes Incorporated, Danville, CA.
- Saunders, H. D. (2008). *Fuel conserving (and using) production function*. Energy Economics 30 (5), 2184–2235.
- Sartori, I. i A. G. Hestnes (2007). *Energy use in the life-cycle of conventional and low-energy buildings: a review article*. Energy and Buildings 39, 249–57.
- Schipper, L. i M. Grubb, (2000). *On the rebound? Feedback between energy intensities and energy uses in IEA countries*. Energy Policy 28(6-7), 367–88.
- Schneider, F. (2008). *Macroscopic rebound effects as argument for economic de growth*, Ecological Sustainability and Social Equity, Paris.
- Schwartz, P. M. i T. N. Taylor (1995). *Cold hands, warm hearth?: climate, net takeback, and household comfort*. Energy Journal 16(1), 41–54.
- Semboja, H.H.H. (1994). *The effects of an increase in energy efficiency on the Kenyan economy*. Energy Policy, Març 1994, 217-225.

Sen, A.K. (1967). *Isolation, Assurance, and the Social Rate of Discount*. Quarterly Journal of Economics 81, 112-124.

Small, K. A. i K. Van Dender (2005). *A study to evaluate the effect of reduced greenhouse gas emissions on vehicle miles travelled*. Preparat per al State of California Air Resources Board, the California Environment Protection Agency and the California Energy Commission, Final Report ARB Contract Number 02-336, Department of Economics, University of California, Irvine.

Small, K. A. i K. Van Dender (2007). *Fuel efficiency and motor vehicle travel: the declining rebound effect*. The Energy Journal 28(1), 25-52.

Sorrell, S. (2007). "The rebound effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency". UK Energy Research Centre. October, 2007.

Sorrell, S. i J. Dimitropoulos (2007). *Review of Evidence for the Rebound Effect. Technical Report 2: Econometric Studies*. Working papers. UK Energy Research Centre. October 2007: REF UKERC/WP/TPA/2007/010.

Sorrell, S., Dimitropoulos, J. i M. Sommerville (2009). *Empirical estimates of the direct rebound effect: A review*. Energy Policy 37(4), 1356-1371.

Stern, D. I. (1997). *Limits to substitution in the irreversibility in production and consumption: a neoclassical interpretation of ecological economics*. Ecological Economics 21, 197-215.

Stern, D. I. (2000). *A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the US macroeconomy*. Energy Economics, 22, 267-83.

Stern, D. I. (2004). *Elasticities of substitution and complementarity*. Working Paper a Economics, No. 0403, Rennselaer Polytechnic Institute.

Strout, A. (1967). *Technological change and U.S. energy consumption*. Tesi doctoral, Univerity of Chicago.

Takase, K.Y., Kondo, K. i A. Washizu (2005). *An analysis of sustainable consumption by the*

waste input-output model. Journal of Industrial Ecology 9 (1-2), 201–219.

Theil, H. (1965). *The Information Approach to Demand Analysis*. Econometrica 33, 67-87.

Train, K. E. (1994). *Estimation of net savings from energy-conservation programs*. Energy 19(4), 423-41.

UNEP (2010). “Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials”, A Report of the Working Group on the Environmental Impacts of Products and Materials to the International Panel for Sustainable Resource Management. Hertwich, E., van der Voet, E., Suh, S., Tukker, A., Huijbregts M., Kazmierczyk, P., Lenzen, M., McNeely, J., Moriguchi, Y.

Victor, P.A. (1972). “Pollution: Economy and Environment”. Oxford, George Allen and Unwin.

Vikstrom, P. (2004). *Energy efficiency and energy demand: a historical CGE investigation on the rebound effect in the Swedish economy 1957*, article presentat a: Input-Output and General Equilibrium Data, Modelling and Policy Analysis, Brussel·les, 2-4h Setembre de 2004.

Walker, I.O. i F. Wirl (1993). *Asymmetric energy demand due to endogenous efficiencies: an empirical investigation of the transport sector*. Energy Journal 14, 183–205.

Walras, L. (1954). “Elements of Pure Economics”. Harvard University Press.

Wang, H. i H. Chuang (1987). *An Input-output model for energy policy evaluation*. Energy Systems and Policy 11, 21-38.

Washida, T. (2004). *Economy-wide model of rebound effect for environmental policy*, article presentat a: International Workshop on Sustainable Consumption, University of Leeds, 5-6 de març de 2004.

Webb, M. i D. Pearce (1975). *The economics of energy analysis*. Energy Policy 3(4), 318–31.

Weber, C. & U. Fahl (1993). *Energieverbrauch und Bedürfnisbefriedigung*.

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 43(9), 605-612.

Weber, C. i A. Perrels (2000). *Modelling lifestyle effects on energy demand and related emissions*. Energy Policy 28, 549-566.

Wei, T. (2006). *Impact of energy efficiency gains on output and energy use with Cobb–Douglas production function*. Energy Policy 35(4), 2023–2030.

Weinblatt, H. (1989). *The FHWA: Faucett VMT Forecasting Model*. Jack Faucett Associates, Bethesda, MA.

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

Wier, M. (1998). *Sources of changes in emissions from energy: a structural decomposition analysis*. Economic Systems Research 10(2), 99-112.

Winther, B. N. i A. G. Hestnes (1999). *Solar versus Green: the analysis of a Norwegian row house*. Solar Energy 66(6), 387–93.

Wirl, F. (1997). “The economics of conservation programs”, Kluwer, Dordrecht.

Wright, D. J. (1974) *Goods and services: an input-output analysis*. Energy Policy 2(4), 307-315.

Wright, D. J. (1975). *The natural resource requirements of commodities*. Applied Economics 7, 31-39.

Wright A. J., Formby J. R. i S. J. Holmes (2000). “A Review of the Energy Efficiency and Other Benefits of Advanced Utility Metering”. EA Technology.

Zhang, Z. X. i H. Folmer (1998). *Economic modelling approaches to cost estimates for the control of carbon dioxide emissions*. Energy economics 20, 101-120.

ANNEX. MUNICIPIS UTILITZATS A LES ESTIMACIONS DE PANELL I VALORS ESTIMATS DELS TERMES INDEPENDENTS INDIVIDUALS DEL MODEL D'EFFECTES FIXOS

Taula 32. Valors estimats dels efectes individuals de les estimacions del Model d'Efectes Fixos per Catalunya

Municipi	α_i	$\mu_i = \mu + \alpha_i^*$
Arenys de Munt	-0,65864	2,69656
Badalona	0,96791	4,32311
Barcelona	2,27417	5,62937
Berga	-0,08174	3,27346
Blanes	0,20532	3,56052
Caldes de Montbui	-0,21148	3,14372
Cardedeu	-0,25270	3,10250
Castell-Platja d'Aro	0,34437	3,69957
Cervera	-0,59421	2,76099
Vilanova i la Geltrú	0,41156	3,76676
Deltebre	-0,30468	3,05052
Esparreguera	-0,16103	3,19417
Figueres	0,09222	3,44742
Gavà	0,24995	3,60515
Girona	0,64749	4,00269
Granollers	0,45960	3,81480
Igualada	0,22220	3,57740
Llinars del Vallès	-0,66985	2,68535
Manresa	0,63241	3,98761
Martorell	-0,23735	3,11785
Mollerussa	-0,38352	2,97168
Montblanc	-0,82648	2,52872
Olesa de Montserrat	-0,23010	3,12510
Parets del Vallès	-0,43987	2,91533
Puigcerdà	-0,46304	2,89216
Reus	0,50698	3,86218
Riudoms	-0,96149	2,39371
Roses	0,34554	3,70074
Sabadell	0,94768	4,30288
Salou	0,53539	3,89059
Sant Celoni	-0,41240	2,94281
Sant Sadurní d'Anoia	-0,40897	2,94623
Santa Maria de Palautordera	-0,63163	2,72357
Sitges	0,29443	3,64963
Solsona	-0,63893	2,71627
Sort	-1,41206	1,94315
Tàrraga	-0,35983	2,99538
Terrassa	0,97522	4,33042
Tona	-0,63593	2,71927
Tortosa	0,05424	3,40944
Valls	-0,13772	3,21748
Vilafranca del Penedès	0,41156	3,76676
Salou	0,53539	3,89059
TOTAL	0	

* El valor de μ a les estimacions del MEF de la Taula 11 ha resultat de 1,957.

