

Universitat Politècnica de Catalunya

Institut universitari de recerca en Ciència i Tecnologies de la
Sostenibilitat

Programa de Doctorat en Sostenibilitat

Tesi doctoral

**Prospectiva energètica al Principat d'Andorra.
Model integrat d'avaluació de la seguretat
energètica per a la transició cap a un escenari
sostenibilista**

Oriol Travesset Baró

Directors

Martí Rosas Casals (Sustainability Measurement and Modeling Lab, UPC)

Èric Jover Comas (Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra)

Maig, 2017



Aquesta obra està subjecta a una llicència CC Reconeixement - No Comercial -
CompartirIgual (by-nc-sa)

No es permet un ús comercial de l'obra original ni de les possibles obres derivades, la
distribució de les quals s'ha de fer amb la mateixa llicència CC que regula l'obra original

AGRAÏMENTS

Vull començar aquestes línies donant gràcies als principals “culpables” d’haver viscut, i en molts moments gaudit, l’aventura de realitzar una tesi doctoral. Martí, el dia que vaig conèixer-te impartint-nos la classe de Sistèmica i Complexitat, vas presentar davant meu un món fins al moment desconegut. A través de conceptes fascinants com el col·lapse o el caos i metodologies com la dinàmica de sistemes i la modelització amb agents, vas aconseguir que gaudís de la formació acadèmica com no havia fet fins al moment. En bona mesura, aquesta tesi comença a forjar-se el dia que poses a les meves mans el llibre *Sustainable Energy – without the hot air* del malaurat físic, matemàtic i acadèmic David J. C. MacKay. Èric, la casualitat i la sort va fer que ens trobéssim, quan l’any 2010, com a director de l’Observatori de la Sostenibilitat d’Andorra (OBSA), necessitaves algú per iniciar una nova línia de treball, l’anàlisi del sistema energètic andorrà. Des d’un inici vas mostrar-me plena confiança i me l’has mantingut al llarg de tots aquests anys. Tot i les teves noves responsabilitats, vull agrair-te l’esforç final que has fet per millorar el resultat final d’aquest treball. Personalment, crec que el més complicat d’un doctorat és la sensació de soledat, per sort, tots dos heu estat al meu costat en els moments més durs i m’heu aportat llum i tranquil·litat quan més ho he necessitat.

Aquesta tesi no hagués estat possible sense les beques i els ajuts a la recerca que proporciona el Govern d’Andorra a través del Departament d’Ensenyament Superior, Recerca i Ajuts a l’estudi. Gràcies també als seus treballadors, i molt especialment a la Marga i l’Helena per la seva atenció i dedicació. Arrel d’aquests ajuts, vaig poder viure l’experiència de realitzar una estada a un dels grups de recerca més potents a nivell europeu en l’àmbit de la modelització de sistemes energètics. Gràcies a tot l’equip de l’*Environmental Research Institute* (University College Cork) per acollir-me fantàsticament durant dos mesos i especialment als companys de l’*Energy Policy and Modelling Research Group* amb els que vaig compartir més moments (Brian, Seán, Eamonn, Fionn, Paul, James, Dennis).

Durant tot aquest procés, ha estat de gran ajuda el suport puntual i desinteressat de diferents persones, com els professors Erik Schaltz, Jose Luis Romeral, Josep Gili i Núria Garrido. També ha estat imprescindible el suport tècnic de l’equip de desenvolupament de l’eina de modelització LEAP (*Long Range Energy Alternatives Planning system*) i concretament l’atenció rebuda en tot moment per part del Taylor, l’Emily i el Charles. I per últim, gràcies

també al personal de la Universitat Politècnica de Catalunya, que amb gent com el Josep i la Sílvia han fet més fàcil la batalla dels tràmits administratius.

Amb la publicació d'aquesta tesi, s'acaba una etapa però en comencen d'altres d'il·lusionants. Trobaré a faltar els dinars internacionals amb les companyes del grup de recerca SummLab (Ioanna, Lina, Fátima i Lorena) i enyoraré moltíssim els bons moments viscuts a Can Batlló i especialment al seu rocòdrom. Encaro amb moltes ganes els projectes engrescadors que tenim a l'OBSA amb els Marcs, el Guillem, la Cris i amb tota la gent de l'Institut d'Estudis Andorrans. Marc Pons i Marc Vilella, treballar amb vosaltres és tot un plaer i més encara poder compartir els *afterworks* periòdics que hem instaurat darrerament. També sou responsables que aquesta tesi hagi arribat a bon port.

Per acabar, aprofito per recordar a la Mariona, que és la persona que més m'ha ajudat a tirar endavant aquesta tesi, tot i que ella cregui que de ciència no en té ni idea. I gràcies també als meus pares i tota la família per fer-me adonar a diari del que és verdaderament important.

Sants, maig de 2017

RESUM

La reforma profunda del sector energètic forma part dels importants reptes als que inevitablement cal fer front a nivell global durant el present segle. El model energètic en que es sustenta el creixement de les principals economies, basat en l'ús intensiu de recursos no renovables, no es pot mantenir a llarg termini ni extrapolar a escala global. Així doncs, és imperatiu explorar alternatives per avançar cap a un nou model energètic més sostenible.

En aquest context de crisi energètica, tot i que les dinàmiques internacionals tindran una influència decisiva, no existeix una solució única, sinó que cada territori haurà de desenvolupar la seva pròpia estratègia. L'anàlisi de la situació actual i la recerca d'actuacions adequades, mitjançant l'avaluació del seu potencial, seran crucials per realitzar una planificació energètica exitosa a mitjà i llarg termini. Andorra, va iniciar el camí de transició cap al seu model energètic de futur, definint-ne les primeres passes en la publicació del Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra l'any 2012. La present tesi doctoral, busca participar en aquest camí, generant coneixement científic que enriqueixi el procés i desenvolupant eines que donin suport a les diferents administracions en la presa de decisions.

L'eix central d'aquesta tesi consisteix en la construcció d'un model del sector energètic andorrà. Aquest integra factors socioeconòmics i ambientals representant les interaccions del sistema energètic amb els principals aspectes influents en la dinàmica nacional. El model avalua la seguretat energètica actual i futura del país des d'una visió integrada, anant més enllà de la perspectiva clàssica de seguretat d'abastiment, i apropant-se des de l'àmbit energètic a la visió holística de la sostenibilitat. Aquest serveix com a eina de suport a la presa de decisions, a través de la construcció d'escenaris exploratoris i normatius, permetent visualitzar els múltiples futurs i les estratègies que condueixen a cada un d'ells.

El model integrat d'avaluació de la seguretat energètica es construeix mitjançant l'eina LEAP (*Long-Range Energy Alternatives Planning System*). Estima l'evolució del sistema energètic pel període 2015-2050 i permet l'entrada d'estratègies polítiques en cada un dels seus àmbits per tal de construir escenaris alternatius i valorar-ne els impactes i viabilitat, sempre tenint en compte el marc de la seguretat energètica.

Aquesta tesi identifica els reptes a afrontar a Andorra en l'àmbit energètic, posa de manifest alternatives per fer-hi front i en quantifica el seu potencial. Implementa el LEAP-Andorra¹, el primer model de planificació energètica d'Andorra a llarg termini i realitza recomanacions per a futurs desenvolupaments del model.

¹<http://www.obsa.ad/leapandorra/>

ABSTRACT

The energy sector reform is one of the major challenges that must be faced globally during the current century. The energy model, in which the economic growth of major economies is sustained, based mainly on the intensive use of non-renewable resources, cannot be maintained in the long term or extrapolated globally. It is therefore imperative to explore alternatives to advance towards a more sustainable energy model.

In this context of energy crisis, despite the decisive influence that international dynamics will have upon it, there is not a unique solution, and each country must develop its own strategy. A thorough current situation analysis, research of strategies and the evaluation of their potential will be crucial to develop a successful medium and long term energy planning. Andorra initiated the process towards his future energy system with the development of the Energy White Paper in 2012. This PhD thesis wants to participate in this path generating scientific knowledge and developing tools to support administrations in their decision making processes.

The core of the thesis is aimed at building a model of Andorra's energy system. It integrates socioeconomic and environmental factors representing the links between energy systems and key national dynamics. The model assesses current and future country's energy security issues with an integrated vision, going beyond the classic perspective of security of supply, and being closer to the sustainability's holistic vision. This model serves as a tool to support decision making actions and allows the construction of exploratory and normative scenarios which help to visualize multiple futures and the strategies to achieve them.

The integrated assessment model of energy security is built with the LEAP (Long-Range Energy Alternatives Planning System) tool. It estimates the future energy system evolution in the period 2015-2050 and allows the inclusion of policy strategies to build alternative scenarios and assess its impacts and feasibility, under the perspective of energy security.

This thesis identifies major energy challenges that must be faced in Andorra, reveals alternatives to confront these challenges and quantifies its potential. It develops LEAP-Andorra², the first long term energy planning model in Andorra and makes recommendations in order to guide future model developments.

²<http://obsa.ad/leapandorra/>

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ. PLANIFICAR PER UN FUTUR MÉS SOSTENIBLE	11
1.1	Prospectiva, models d'avaluació integrada i seguretat energètica.....	12
1.1.1	Prospectiva	13
1.1.2	Mètode d'escenaris.....	14
1.1.3	Models d'Avaluació Integrada.....	16
1.1.3.1	Models regionals	20
1.1.3.2	Models de planificació energètica.....	21
1.1.4	Perspectives en seguretat energètica	32
1.2	Objectius de la tesi.....	36
1.2.1	Objectiu general.....	36
1.2.2	Objectius específics.....	36
1.3	Metodologia	37
1.3.1	Marc d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra.....	37
1.3.2	Implementació del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica.....	38
1.4	Referències.....	40
2	MODELITZACIÓ DE LA DEMANDA ENERGÈTICA.....	45
2.1	Descripció general del model LEAP-Andorra.....	45
2.1.1	Comptabilització de les emissions de GEH.....	46
2.2	Assumpcions macroeconòmiques.....	47
2.2.1	Població.....	47
2.2.2	Producte Interior Brut.....	48
2.2.3	Preu del petroli	49
2.2.4	Visitants	49
2.3	Sector residencial.....	50
2.3.1	Caracterització dels habitatges	50
2.3.2	Calefacció.....	52
2.3.2.1	Estoc d'habitatges 2010.....	53
2.3.2.2	Habitatges post 2010 i habitatges renovats.....	54
2.3.3	Aigua Calenta Sanitària.....	56
2.3.4	Aire condicionat	57
2.3.5	Il·luminació.....	59
2.3.6	Cuina.....	60

2.3.7	Electrodomèstics.....	60
2.4	Sector del transport	61
2.4.1	Parc de turismes	62
2.4.2	Altres consums interns	64
2.4.3	<i>Fuel tourism</i>	66
2.5	Administració pública	67
2.5.1	Edificis públics.....	68
2.5.2	Enllumenat públic	74
2.6	Sectors secundari i terciari	75
2.6.1	Electricitat.....	76
2.6.2	Fuel domèstic	77
2.7	Escenaris de futur.....	78
2.7.1	Escenari de referència	78
2.7.1.1	Sector residencial.....	78
2.7.1.2	Sector del transport.....	83
2.7.1.3	Administració pública	87
2.7.1.4	Sector secundari i terciari	88
2.7.2	Mesures d'estalvi i eficiència energètica	92
2.7.3	Escenari Eficient.....	93
2.8	Resultats i discussió	94
2.8.1	Escenari de referència	95
2.8.2	Mesures d'estalvi i eficiència energètica	98
2.8.3	Escenari Eficient.....	100
2.9	Referències.....	104
3	MODELITZACIÓ DE L'ABASTIMENT D'ENERGIA.....	108
3.1	Introducció	108
3.2	Abastiment d'energia elèctrica	109
3.2.1	Transport i distribució elèctrica.....	111
3.2.2	Generació elèctrica actual.....	112
3.2.2.1	Hidroelèctrica	113
3.2.2.2	Centre de Tractament de Residus.....	113
3.2.2.3	Energia solar fotovoltaica.....	114
3.2.3	Importacions	115
3.2.4	Noves tecnologies de generació elèctrica.....	116
3.2.4.1	Solar fotovoltaica a gran escala	116
3.2.4.2	Minihidroelèctrica	117
3.2.4.3	Eòlica.....	118

3.2.4.4	Cogeneració.....	118
3.3	Recursos energètics	119
3.4	Escenaris de futur	121
3.4.1	Escenari de referència	122
3.4.2	Escenari Eficient.....	122
3.4.3	Escenari Llibre Blanc.....	122
3.4.4	Escenari Òptim	123
3.4.5	Escenari Òptim amb límit de CO ₂	124
3.5	Resultats.....	124
3.5.1	Escenari de referència	124
3.5.2	Escenari Eficient.....	125
3.5.3	Escenari Llibre Blanc.....	126
3.5.4	Escenari Òptim	127
3.5.5	Escenari Òptim amb límit de CO ₂	128
3.6	Discussió	131
3.6.1	Potencial de l'energia solar fotovoltaica en cobertes d'edificis.....	133
3.6.2	Demanda de recursos energètics en els diferents escenaris futurs.....	135
3.6.3	Compliment dels compromisos climàtics	136
3.7	Referències.....	139
4	SEGURETAT ENERGÈTICA A LLARG TERMINI EN ESCENARIS DE REDUCCIÓ	
	D'EMISSIONS.....	142
4.1	Avaluació de la seguretat energètica	142
4.1.1	Estat actual de la seguretat energètica d'Andorra.....	144
4.2	Seguretat energètica futura	148
4.2.1	Escenari de referència	149
4.2.2	Escenari Eficient.....	150
4.2.3	Escenari Llibre Blanc.....	151
4.2.4	Escenari Òptim	152
4.2.5	Escenari Òptim amb límit de CO ₂	153
4.3	Resultats.....	153
4.3.1	Sobirania	154
4.3.2	Robustesa.....	157
4.3.3	Resiliència.....	162
4.4	Discussió	165
4.5	Referències.....	169
5	CONCLUSIONS. CAP A LA SOSTENIBILITAT DES DE L'ÀMBIT ENERGÈTIC	171

5.1	Seguretat energètica i sostenibilitat a Andorra	172
5.2	Treball en curs i línies de desenvolupament futur	175
5.2.1	Futur del model LEAP-Andorra	175
5.2.2	Més enllà del model LEAP.....	177
5.3	Referències.....	179
ANNEX A	GLOSSARI D'ACRÒNIMS.....	182
ANNEX B	PUBLICACIONS CIENTÍFIQUES	184

1 INTRODUCCIÓ. PLANIFICAR PER UN FUTUR MÉS SOSTENIBLE

La història de la civilització humana ha estat íntimament lligada a la cerca permanent de fonts energètiques i les seves formes d'aprofitament, situant l'energia com un vector del procés evolutiu de les societats (Cunningham, 2003). En l'actualitat, l'energia és un factor essencial en el desenvolupament de l'economia a totes les escales, condicionant l'estructura i funcionament de tota societat moderna (Bardi, 2013). Tant el seu cost econòmic com la seguretat i fiabilitat de subministrament són elements fonamentals per a l'economia, que afegits a les externalitats que el seu ús provoca sobre el medi ambient i la societat, aporten una idea del paper cabdal que juga la política energètica en el progrés d'un país.

La connexió entre consum energètic, desenvolupament econòmic i medi ambient, s'ha convertit en un tema candent de l'agenda política global (Ramos-Martín et al., 2011). Es poden resumir en tres els grans focus d'atenció en política energètica, motivats per les causes principals de la insostenibilitat del model actual (Mackay, 2009): (a) l'esgotament dels combustibles fòssils i particularment del petroli, (b) la seguretat d'abastiment d'energia i (c) l'escalfament global provocat en gran mesura per les emissions de CO₂ provinents de la combustió de combustibles fòssils.

La situació energètica a Andorra està molt lligada a la dinàmica del seu entorn però inclou alguns aspectes rellevants degut a les particularitats del país que el fan altament vulnerable en termes de seguretat energètica. Entre aquests factors hi destaca per damunt de tot, l'alta dependència exterior. Un altre aspecte que condiona la política energètica del país és l'adhesió l'any 2011 al Conveni marc de les Nacions Unides i el posterior compromís de reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH) en un 37% l'any 2030 respecte a l'escenari de referència (Govern d'Andorra, 2015).

La forta dependència energètica de l'exterior és una característica remarcable de l'actual model energètic d'Andorra (96% de l'energia total i 83% de l'electricitat és importada). Aquesta particularitat posa de manifest la carència de sobirania del país, no entesa en el seu sentit polític (com es troba tradicionalment en la literatura), sinó des d'una perspectiva energètica i tecnològica (Rosas-Casals et al., 2014). Aquest factor, juntament amb la demanda energètica en continu creixement anual, el risc de saturació de les línies d'importació elèctrica, l'augment constant dels preus dels carburants i de les tarifes elèctriques, la necessitat d'integrar la política energètica a la resta de polítiques sectorials i

la voluntat del compliment de les directrius energètiques europees van motivar l'elaboració del Pla Estratègic de l'Energia 2006-2015 (Govern d'Andorra, 2007a). En aquest pla es defineix el camí i objectius del país en matèria d'energia fins l'any 2015, els quals són actualitzats en el Llibre Blanc de l'Energia (Govern d'Andorra, 2012). Tot i que la recerca en política energètica ha estat poc treballada en el marc andorrà, a banda dels plans institucionals, s'han realitzat altres aproximacions a l'àmbit energètic com l'estudi del consum d'energia del sector domèstic, per part de l'Institut Cerdà, l'estudi encarregat per l'AESE (Associació d'Entitats del Sector Energètic) sobre l'aprofitament dels recursos naturals d'Andorra o la quantificació del potencial d'eficiència energètica en el sector de l'edificació a càrrec del Col·legi Oficial d'Arquitectes d'Andorra i Sabaté Associats, tots ells documents no públics.

En la tesina final del màster en Sostenibilitat (Travesset-Baro, 2012), es fa una primera aproximació a l'estat del sector energètic andorrà, realitzant un anàlisi de prospectiva de la demanda energètica a un horitzó 2050. Aquesta, traça escenaris de consum que permeten disposar d'una referència del que podria succeir si les polítiques energètiques segueixen les línies presents. La tesina va ser el resultat d'un projecte emmarcat dins la realització del Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra, proposat i supervisat per FEDA (Forces Elèctriques d'Andorra) i realitzat conjuntament des de l'OBSA (Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra) i el grup de recerca multidisciplinari SUMM Lab (*Sustainability Measurement and Modelling Lab*) de la Universitat Politècnica de Catalunya.

La cooperació entre institucions andorranes i el centre de recerca SUMM Lab es ratifica en aquesta tesi doctoral, aportant un interès tècnic complementari al purament científic i facilitant la transferència bidireccional de coneixement amb FEDA i l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic d'Andorra (OECC).

1.1 Prospectiva, models d'avaluació integrada i seguretat energètica

L'interès pel futur ha estat en la ment humana des dels inicis de la civilització. El naixement de la consciència del futur es pot associar a l'aparició de la tecnologia dos o tres milions d'anys enrere (Malaska, 2000). En un moment concret del passat, alguns antecessors de la nostra espècie van iniciar-se en la utilització d'eines. Utilitzaven elements naturals com pedres o branques per tal de facilitar accions quotidianes. Aquestes eines eren llençades immediatament després de ser utilitzades, no tenien un valor d'ús permanent, pel que aquest fet no tenia transcendència pel desenvolupament d'una consciència de futur. En aquest sentit, l'elaboració de la primera pedra foguera va significar un punt d'inflexió. Aquesta eina era més útil per a la supervivència que la resta d'elements de l'entorn natural,

aconseguint que un cop utilitzada fos cuidadosament guardada per gaudir-ne en ocasions futures. Des d'aquest moment, la consciència del futur ha estat part intrínseca de la realitat humana i l'experiència del dia a dia juntament amb la consciència del passat i el present.

Vaticinar o conèixer el futur ha estat històricament una les principals preocupacions de la humanitat, la qual s'ha mantingut inalterable amb el pas de les diferents civilitzacions. La majoria de cultures han dipositat la seva confiança en referents diversos, els quals n'han guiat les decisions mostrant les conseqüències d'una o altra elecció. Probablement el més famós va ser l'Oracle de Delfos, on es consultava la divinitat sobre diferents temes (Janer, 2011).

El desig per conèixer què ens amaga el demà, ha estat històricament vigent en el pensament humà i sembla no haver canviat amb el pas del temps. Multituds d'exemples es poden trobar tant en el passat com en el present: lectures de cartes, religió, boles de cristall, profecies, horòscops, són alguns dels fets que demostren el desig intrínsec dels humans per conèixer el futur. Les característiques pròpies del futur fan difícil l'estudi d'aquest des d'una rigorosa perspectiva científica. Com estudiar un fet que encara no ha succeït, passa a ser un repte per a la comunitat científica.

La futurologia es considera la primera aproximació científica a l'estudi del futur. El terme neix l'any 1946 (Sardar, 2010) de la mà del professor alemany Ossip K. Flechtheim i treballs com *The Art of conjecture* (Jouvenel, 1967) o *Inventing the future* (Gabor, 1965) defineixen les bases conceptuals i metodològiques en el camp dels estudis de futur. Al llibre *History and Futurology* (Flechtheim, 1966) es proposa la futurologia com a branca del coneixement i la presenta com la nova ciència de la probabilitat. El rigor científic d'aquesta va ser ben aviat posat en dubte per gran part de la comunitat científica que es dedicava a la investigació del futur i es van centrar esforços en avançar cap a un marc teòric general que es pogués acceptar dins el mètode científic (Zemen, 1971). En aquests moments s'inicia l'aparició de nous conceptes ressaltant la importància de parlar de futurs alternatius i plurals, enlloc d'un únic futur ja escrit.

1.1.1 Prospectiva

La prospectiva es diferencia de la futurologia en el fet que no pretén fer pronòstics. Parteix de la premissa que el futur ha de ser construït, per tant no pot ser concebut com una simple continuació del passat. També es distingeix de la previsió en el fet que aquesta considera el futur immediat partint dels precedents, analogies i extrapolacions. De totes maneres, cal deixar patent que la prospectiva no viu aliena al passat. En aquest sentit,

previsió i prospectiva es complementen, però és important remarcar que aquesta última es basa en un clar esperit constructivista del futur des del present.

A finals dels anys cinquanta, el filòsof francès Gaston Berger proposa l'ús del terme prospectiva per ressaltar la necessitat d'una actitud orientada al futur (Berger, 1964). Aquest, defineix cinc característiques principals de l'actitud prospectiva:

- *Mirar a la llunyania.* És a dir, concentrar l'atenció amb intensitat sobre l'esdevenidor llunyà. La prospectiva es centra en una preocupació a llarg termini.
- *Mirar amb amplitud.* Cal superar la visió limitada de l'especialista, anar amb compte i tenir presents les interaccions.
- *Mirar en profunditat.* Detectar i tenir en consideració els factors determinants i les seves tendències.
- *Assumir riscos.* Horitzons llunyans ens poden fer canviar els plans a llarg termini. Sovint les decisions han de ser agosarades.
- *Tenir cura de la humanitat.* L'interès principal de la prospectiva és l'ésser humà, i per tant, centra l'atenció en les conseqüències que les noves tècniques i esdeveniments poden exercir sobre la humanitat.

Els camps que estudia la prospectiva es troben en el terreny de la complexitat. El món és dinàmic, canvia constantment i per tant, és incert. La prospectiva no pretén eliminar aquesta incertesa i així poder fer prediccions, sinó reduir-la tant com sigui possible. D'aquesta manera ha de permetre prendre decisions basades en futurs hipotètics. En altres paraules, la prospectiva és l'estudi dels futurs possibles.

Front al futur, la humanitat té l'elecció d'adoptar quatre actituds possibles. L'estruç passiu que pateix el canvi, el bomber reactiu que s'ocupa de combatre el foc un cop aquest ja s'ha declarat, l'assegurador pre-actiu que es prepara pels canvis previsibles sabent que la reparació surt més cara que la prevenció i el conspirador pro-actiu que intenta provocar canvis desitjables (Godet and Roubelat, 1996). La prospectiva es considera pre-activa quan s'utilitza per anticipar-se als canvis o pro-activa si busca provocar-los.

Si bé a França i a la resta d'Europa els estudis prospectius són freqüents, a Espanya i Catalunya són més escassos. L'Institut Català d'Estudis Mediterranis va fer el primer estudi prospectiu a principis dels anys noranta, *Catalunya a l'horitzó 2010* (Jouvenel and Roque, 1993). Per la seva banda, a Andorra es publicà anys enrere el *Programa Andorra 2020* (Govern d'Andorra, 2007b), amb l'objectiu d'orientar la política de futur del país.

1.1.2 Mètode d'escenaris

La idea de múltiples futurs i la visió constructivista que porta intrínseca la prospectiva, exigeixen d'un mètode per a plasmar aquestes característiques. En aquest sentit, el mètode d'escenaris pot ésser considerat com el complement ideal a l'actitud prospectiva.

D'acord amb Van der Heijden (2005), la planificació d'escenaris neix a finals de la Segona Guerra Mundial com un mètode de planificació militar, i es va expandir al context social i de polítiques públiques de la mà de Herman Kahn, popularitzant el terme escenari en el llibre *The Year 2000*. Aquest autor es considerat per la major part de la bibliografia com el pare de la planificació d'escenaris.

Schwartz (1991) defineix el mètode d'escenaris com un enfocament orientat a processos estratègics, amb una visió d'un món imprevisible, però on algunes tendències i esdeveniments poden ser pronosticats. El mètode d'escenaris és una tècnica complementària a l'enfocament prospectiu. La prospectiva crida a l'acció, i els escenaris marquen el camí en funció de la visió adoptada i la probabilitat. El següent pas natural és escollir l'estratègia a seguir per arribar al futur desitjat.

Un escenari és la descripció d'una situació futura i el curs dels esdeveniments que li permeten a hom avançar a partir de la situació original. Existeixen dues tipologies d'escenaris en funció del tipus de visió adoptada (Godet and Roubelat, 1996):

- *Exploratoris*. Partint de tendències passades i presents, condueixen cap a un futur versemblant.
- *Anticipatoris o normatius*. Construïts en base a diferents visions del futur. Futurs desitjats o per contra futurs temuts.

Sovint també es fa una altra distinció entre escenaris segons la seva probabilitat:

- *Escenaris possibles*. Tots els que poden ser imaginats.
- *Escenaris realitzables*. Tot el que és possible, tenint en compte les limitacions.
- *Escenaris desitjables*. Entrarien dins la categoria de possibles però no forçosament han de ser realitzables.

En la pràctica, no existeix un mètode d'escenaris únic. Hi ha una gran varietat de formes de construir-los (alguns simples, altres més sofisticats), no obstant, existeix consens en que el terme *mètode d'escenaris* només pot ser aplicat en l'enfocament que inclou almenys els següents passos: anàlisi de sistemes, retrospectiva, anàlisi d'actors estratègics i elaboració d'escenaris (Godet and Roubelat, 1996).

El mètode d'escenaris apareix com una nova eina per explorar un món cada vegada més incert i complex. Juntament amb els models de simulació, l'enfocament d'escenaris ha estat aplicat en un gran nombre de projectes de canvi global. Un bon exemple el trobem en l'escenari de referència de la publicació *The Limits to Growth* (Meadows et al., 1972). Aquest,

alerta sobre el possible col·lapse de la societat durant el present segle, provocat principalment per l'esgotament dels recursos naturals. Tal com s'observa en la Fig. 1.1, la producció industrial i la població creixen fins que una combinació d'escassetat de recursos i augment de la contaminació eliminen la capacitat del sector del capital de sostenir la inversió. El capital industrial comença a depreciar-se amb més rapidesa que el que la nova inversió pot reconstruir. A mesura que cau, els serveis sanitaris i els aliments també cauen, reduint les expectatives de vida i elevant la taxa de mortalitat (Meadows et al., 1992).

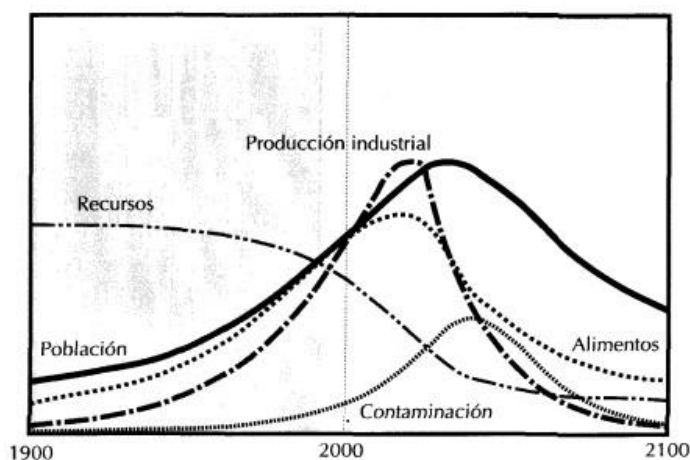


Fig. 1.1. Escenari de referència de la publicació *The Limits to Growth*. Font: Meadows et al. (1992)

Aquest és un dels escenaris resultants de *World3*, el primer Model Integrat Global realitzat pel *Massachusetts Institute of Technology* a petició del Club de Roma. Es considerat una de les primeres passes en el marc del concepte de Desenvolupament Sostenible, formalitzat per primer cop en l'informe *Our Common Future* (World Commission on Environment and Development, 1987) i conegut popularment com Informe Brundtland. Aquest fet és una mostra de la importància i la validesa de les eines de modelització en el camp d'estudi de la Sostenibilitat.

1.1.3 Models d'Avaluació Integrada

La creixent interacció entre qüestions socials, econòmiques i ambientals, exigeix la definició de polítiques mitjançant un enfocament integrat. L'avaluació integrada analitza un sistema de forma conjunta, tenint en compte les principals interaccions i retroalimentacions dels diferents àmbits, i amb un clar objectiu de definir polítiques prioritàries. La complexitat del sistema en que ens trobem, implica que el conjunt és significativament diferent de la simple suma de les parts i que abordar problemes estratègics sigui impossible des d'una

sola disciplina. En aquest sentit, l'avaluació integrada aporta un mètode que possibilita integrar les ciències naturals i socials, unint dos àmbits totalment relacionats en la realitat però estudiats de forma aïllada fins fa ben poc.

Existeix una gran varietat de metodologies d'avaluació integrada, d'una banda, els mètodes analítics, habitualment més associats a les ciències naturals i d'altra, els mètodes participatius, provinents de les ciències socials. Aquesta tesi es centra en un dels mètodes analítics d'avaluació integrada dominants en l'actualitat, concretament els Models d'Avaluació Integrada (IAMs, per les seves sigles en anglès). Els IAMs són simulacions realitzades amb ordinador amb la finalitat de descriure quantitativament les relacions causa-efecte d'un assumpte específic, i detallar els vincles i interaccions entre els seus àmbits (Rotmans and Asselt, 2003). La modelització fa possible l'anàlisi dels sistemes complexos, estudiar-ne les seves respostes i determinar-ne els elements crítics.

Els actuals IAMs deuen el seu origen als Models Integrats Globals (IGMs, per les seves sigles en anglès) nascuts a la dècada dels anys setanta. Fins aquella època, la gran majoria de models realitzats per estudiar el futur estaven basats en l'econometria. A partir d'aquest moment, el gran avenç en la computació impulsa la utilització d'ordinadors en el camp de la modelització, convertint-se avui dia en una eina imprescindible per a la implementació dels models. Aquest fet, entre altres, permet la utilització de quantitats de dades molt superiors a les utilitzades en èpoques anteriors i en facilita el seu processament. El primer IGM es remunta a 1970 amb la creació del *World2* per part de Jay W. Forrester. Aquest fou el punt de partida pel desenvolupament del que encara és avui dia el model global més conegut, el *World3* (Meadows et al., 1972). Des de llavors, la creació de models globals s'ha anat estenent, impulsats per les contínues millores computacionals i per l'augment de bases de dades globals aparegudes principalment arrel del recent interès en el canvi climàtic. Robert Costanza és un dels autors referents en el camp dels models globals. Segons aquest, en un món com l'actual, és necessari prioritzar l'estudi del conjunt front al de problemes aïllats. En aquest sentit, defensa l'ús dels IGMs per afrontar els creixents problemes de caire global, com el canvi climàtic. La Fig. 1.2 il·lustra el grau en que cada IGM analitzat per Costanza et al. (2007) representa els sistemes naturals i socials, així com el seu nivell de calibratge històric.

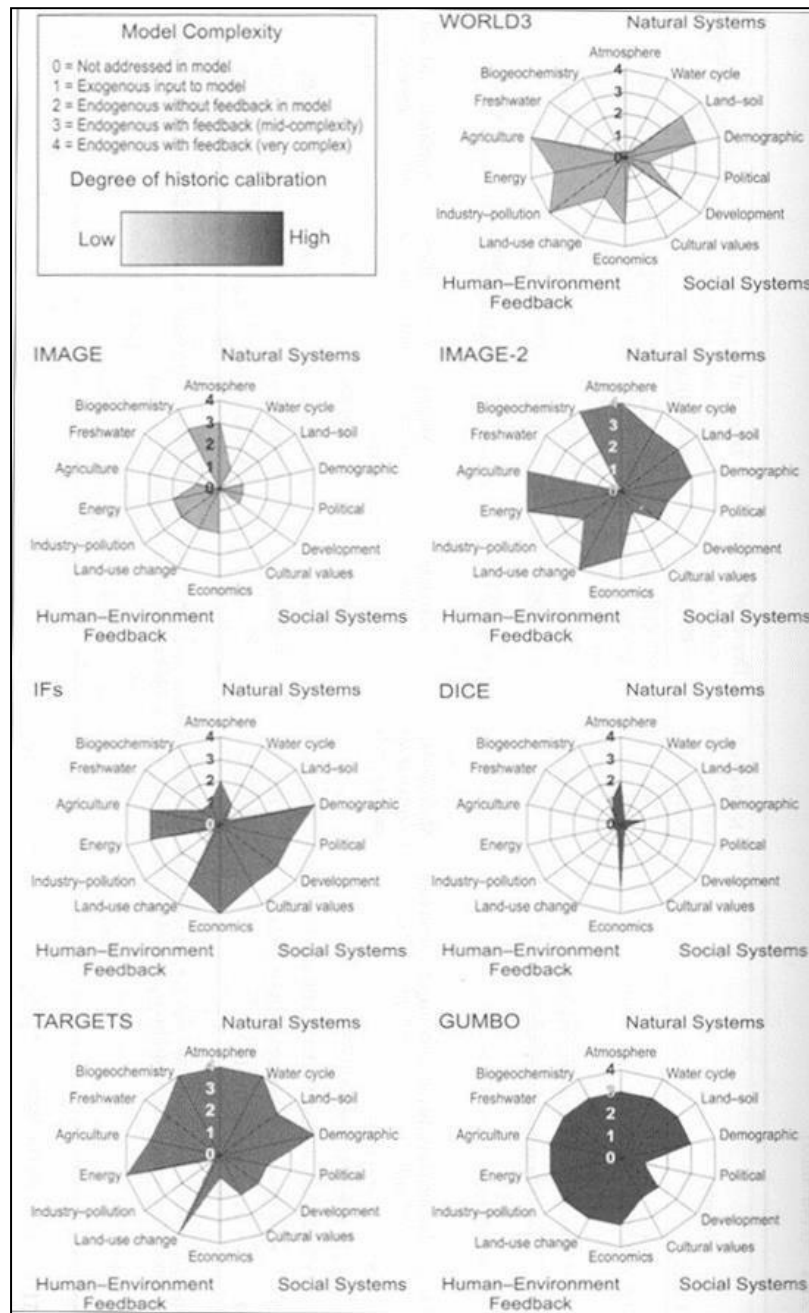


Fig. 1.2. Diagrama de complexitat dels principals IGMs. Font: Costanza et al. (2007)

En general, els models globals tenen un alt nivell d'agregació, incloent representacions generalistes de la pol·lució o de l'esgotament de recursos, fent difícil abordar problemàtiques particulars.

D'altra banda, des dels seus inicis, els IAMs han estat clarament orientats a abordar temàtiques mediambientals amb una visió integrada, des de models d'energia, acidificació i posteriorment centrant-se principalment en models de canvi climàtic. Weyant et al. (1996) classifica els IAMs en dos grans grups: (a) models d'optimització de polítiques i (b) models d'avaluació de polítiques. Els primers busquen optimitzar variables polítiques clau, com els ratis d'emissions o les taxes de CO₂, partint d'uns objectius polítics (com maximitzar el benestar o minimitzar els costos de polítiques de mitigació del canvi climàtic). Els models d'optimització es poden dividir en tres tipus principals:

- (1) *Models cost-benefici*, els quals valoren els costos d'una intervenció política i els contraposen amb els beneficis que aquesta aporta, amb l'objectiu de determinar la intervenció òptima. Cal tenir en compte que en la pràctica, únicament els costos i beneficis mesurables es poden tenir en compte, la qual cosa condiona l'anàlisi.
- (2) *Models basats en objectius*, els quals parteixen d'uns objectius polítics i busquen assolir-los a través de l'escenari òptim.
- (3) *Models basats en incerteses*, els quals aborden la presa de decisions tenint en compte diferents condicions d'incertesa.

Els models d'avaluació de polítiques, busquen avaluar les conseqüències ambientals, econòmiques i socials d'estratègies polítiques específiques. Seguint amb el marc teòric definit per Weyant et al. (1996), aquests es poden classificar en dos tipus:

- (1) *Models determinístics*, en els quals l'aleatorietat no es contempla en el desenvolupament d'estats futurs del sistema. Donades unes condicions o estat inicial fix, aquests models sempre aporten el mateix valor resultant.
- (2) *Models estocàstics*, on almenys algunes entrades o sortides del model són tractades amb caràcter aleatori. En aquests models, mateixes condicions inicials poden conduir a resultats diferents.

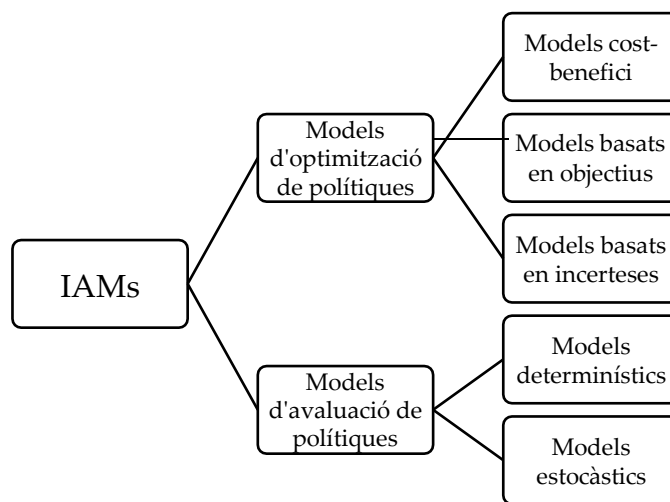


Fig. 1.3. Tipologia de Models d'Avaluació Integrada. Font: Weyant et al. (1996)

La Fig. 1.3 resumeix la tipologia d'IAMs plantejada. Tal com reconeix el propi autor, la classificació proposada és de caràcter general i alguns models poden utilitzar-se per a diferents objectius, així doncs, es podrien incloure en vàries de les tipologies esmentades.

Els models integrats són una eina útil i llargament estesa per estudiar i buscar solucions a problemes, majoritàriament de caire global, com el canvi climàtic. En aquest sentit, es poden veure com una esperança per donar resposta a les crisis globals a les quals s'enfronta la humanitat: creixement poblacional continu, crisi alimentària, crisi energètica, crisi climàtica i ambiental, i crisi econòmica i financera. En un món cada vegada més globalitzat la relació entre les diferents crisis s'enforteix i la seva repercussió s'estén ràpidament per tot el planeta. Un problema important amb el que es troben els IAMs aplicats a escala global és que els instruments de governabilitat mundial són encara molt febles, el que fa gairebé impossible adoptar les mesures plantejades pels models. Per altra banda els problemes es poden manifestar de forma molt desigual entre territoris i fins i tot existir-ne de particulars en funció de la regió estudiada.

Molts models integrats tenen un caràcter bastant abstracte, en part provocat pel nivell d'escala global en que operen. Malgrat l'orientació dominant cap a la modelització global, Rotmans and Asselt (2003) assenyalen que existeix una necessitat i interès creixent en la realització de models regionals, i que estudis realitzats a escala local o regional mostren el valor afegit d'aquests models.

1.1.3.1 Models regionals

La modelització a escala global, generalment té una estructura *top-down* (de dalt a baix). Captura els mecanismes i relacions arreu del planeta, però en la majoria dels casos amb una baixa resolució espacial. Sovint, buscant representar tot el sistema Terra es perd la variabilitat espacial a escala regional o local.

Per altra banda, partir d'un enfocament *bottom-up* (de baix a dalt) permet obtenir més detall dels processos estudiats facilitant així l'adopció d'estratègies concretes i la posada en pràctica d'aquestes. L'enfocament *bottom-up*, més característic dels models regionals, aporta a aquests algunes característiques que els fa especialment interessants en determinats casos. Escollir l'escala adequada és determinant en la confecció de models regionals o locals i aquesta vindrà determinada per les preguntes a les que faci front l'estudi.

Els models regionals poden ser de gran utilitat per afrontar problemàtiques particulars o aquelles que no afectin de forma homogènia a tot el planeta. A més de facilitar l'operativitat en la presa de decisions, també poden ser concebuts com a peces per a la construcció de

futurs models globals. Easterling (1997) argumenta deu raons per justificar la necessitat d'enllaçar estudis regionals amb models globals.

En el camp de la modelització de sistemes energètics, el nivell d'escala en el que es desenvolupa l'anàlisi és també un factor determinant, i vindrà condicionat en gran mesura pel propòsit pel qual ha estat construït el model. En el cas de la seguretat energètica, és important que l'anàlisi estigui focalitzada en un context geogràfic específic enlloc d'utilitzar consideracions genèriques o abstractes. La complexitat dels reptes relacionats amb la seguretat energètica fa que sigui aconsellable l'estudi d'aquesta a escala nacional (Cherp and Jewell, 2011).

A continuació es descriuen models existents i aplicacions notòries dels principals models de planificació energètica amb un enfocament integrat.

1.1.3.2 Models de planificació energètica

La modelització i el mètode d'escenaris han estat eines àmpliament utilitzades en la planificació energètica nacional des de mitjans de la dècada dels anys 70. Inicialment l'interès es centrava en la seguretat energètica, focalitzada principalment en l'abastiment de petroli. Més endavant, i fins l'actualitat, els temes ambientals i principalment el canvi climàtic es converteixen en els principals assumptes a abordar pels responsables de la presa de decisions. Recentment però, la seguretat energètica torna a emergir com el principal focus d'interès, abordant-se actualment des d'una perspectiva interdisciplinària (Gargiulo and Gallachóir, 2013). Existeixen un bon nombre de models d'energia, diferenciats en funció del propòsit, estructura, enfocament analític, cobertura geogràfica, sectors considerats, etc. Aquest capítol es centra en els principals models actualment en ús, i construïts específicament per a l'anàlisi del potencial de polítiques focalitzades en l'estudi del canvi climàtic i la seguretat energètica.

La classificació més estesa entre els models d'energia es centra en el seu enfocament analític (*top-down* o *bottom-up*). Generalment, en els models *top-down* l'energia es modelitzada de forma agregada i la seva evolució està condicionada per factors macroeconòmics. S'utilitzen per preveure l'efecte de l'evolució econòmica en l'energia i el medi ambient, però no tenen la capacitat d'avaluar en detall les diferents tecnologies i sectors energètics existents. D'altra banda, la modelització *bottom-up*, representa de forma detallada els diferents sectors del sistema energètic, així com les tecnologies existents i futures. Parteixen d'una visió basada en l'enginyeria, utilitzant dades tècniques reals i fent possible l'anàlisi del potencial d'estalvi energètic de les diferents opcions tecnològiques. Per contra, no acostumen a representar l'efecte de les polítiques analitzades sobre els indicadors

macroeconòmics i el preu de l'energia (Knight, 2012). La Taula 1.1 mostra detalladament les característiques de les dos principals tipologies de models d'energia.

Models top-down	Models bottom-up
Enfocament basat en l'economia	Enfocament basat en l'enginyeria
No representen les opcions tecnològiques en detall	Permeten una representació detallada de les diferents opcions tecnològiques
Reflecteixen la tecnologia actual adoptada pel mercat	Reflecteixen el potencial tecnològic
Usen dades agregades amb una finalitat de predicció	Usen dades desagregades amb una finalitat d'exploració
Basats en observacions del comportament del mercat	Independents del comportament del mercat
No tenir en compte les tecnologies disponibles més eficients, fa que subestimïn el potencial de l'eficiència energètica	No tenir en compte el mercat (costos ocults i altres limitacions), fa que sobreestimïn el potencial de l'eficiència energètica
Determinen la demanda energètica a través d'agregats macroeconòmics, però estudien l'abastiment d'energia amb diferents metodologies	Representen les tecnologies d'abastiment energètic en detall i de forma desagregada, però estudien la demanda energètica amb diferents metodologies
Treballen amb relacions endògenes	Avaluen els costos de les opcions tecnològiques directament
No assumeixen discontinuïtats en les tendències històriques	Les interaccions assumides entre el sector energètic i els altres sectors són molt febles

Taula 1.1. Característiques dels models *top-down* i *bottom-up*. Font: Nakata (2004)

Knight (2012) identifica tres categories de models, generalment aplicables únicament a models *bottom-up*:

- (1) Els *models d'optimització* s'utilitzen típicament per estimar els resultats de polítiques específiques donades una sèrie de restriccions (p.ex. minimitzar el cost d'abastiment d'energia sense superar un límit d'emissions de CO₂ definit). Els models d'optimització tenen l'avantatge d'aportar la solució que millor s'ajusta a l'objectiu prèviament definit, però sovint els manca la flexibilitat de tenir en compte altres limitacions que es donen en el món real.
- (2) Els *models de simulació* ofereixen estructures més flexibles que els models d'optimització, permetent una major integració de dades i limitacions de la vida real. Per la seva naturalesa, aquests models no permeten l'optimització, i per tant, no són capaços d'identificar per si mateixos la millor solució. Els responsables de la presa de decisions són els encarregats d'analitzar els múltiples escenaris resultants i escollir en funció dels objectius establerts.
- (3) Els *models de comptabilitat*, enlloc de buscar simular amb precisió el comportament del sistema energètic, estan orientats a la gestió de dades i a l'avaluació dels impactes provocats per canvis en determinades activitats. Exploren l'evolució dels recursos, les implicacions mediambientals i els costos socials de futurs escenaris

energètics alternatius sota la pregunta “Què passaria si...”. Val a dir que alguns autors, consideren aquest tipus de models un cas particular de models de simulació.

D'altra banda, els models econòmics i els d'equilibri econòmic, són en general únicament aplicables a models *top-down*, tot i que existeixen algunes excepcions tal com s'exposa més endavant. Els primers, apliquen metodologies estadístiques per extrapolar a mitjà i llarg termini les tendències de comportament del mercat. Els models d'equilibri econòmic estudien el sector energètic com a part de l'economia general i es centren en les interaccions entre el sector energètic i la resta de l'economia. Existeix una distinció entre models d'equilibri parcial i models d'equilibri general. Els models d'equilibri parcial únicament es centren en l'equilibri de parts concretes de l'economia, com per exemple la demanda i el subministrament energètic. Els models d'equilibri general busquen l'equilibri de tota l'economia de l'àrea geogràfica sota estudi, permetent les interaccions entre mercats econòmics individuals.

És important remarcar que molts dels models actuals combinen varies de les característiques exposades, coneixent-se com a models híbrids. Tal com assenyala Loulou et al. (2005), les distincions clàssiques entre models són cada vegada més difuses degut als avenços en ambdues categories principals. En el cas dels models *top-down*, diversos models d'equilibri econòmic inclouen un nivell de detall considerable en el sector de l'abastiment d'energia. D'altra banda, els models *bottom-up* més recents estan avançant en la representació dels efectes de l'economia global al sistema energètic i viceversa, incorporant factors com la sensibilitat de la demanda als preus de l'energia o l'impacte de l'evolució del sector energètic en l'economia.

A continuació es detallen alguns dels models d'energia més rellevants en l'actualitat i es citen aplicacions destacades d'aquests. La Taula 1.2 resumeix les característiques principals dels models presentats: àrea geogràfica, tipus de model, abast dels escenaris i interval temporal. L'ordre en que els models son presentats es basa en la seva cobertura geogràfica, partint de models d'abast global fins als que han estan dissenyats per treballar a més petita escala.

Nom del model	Àrea geogràfica	Tipus de model	Abast dels escenaris	Interval temporal	Organització (enllaç web)
GCAM	Global	<i>Top-down</i> / Equilibri econòmic parcial	Fins l'any 2095	5 anys	PNNL http://www.globalchange.umd.edu
MESSAGE	Global/regional	<i>Bottom-up</i> / Optimització	Fins l'any 2100	10 anys	IIASA http://www.iiasa.ac.at

PRIMES	Unió Europea	<i>Bottom-up/ Top-down/</i> Equilibri econòmic parcial	Màxim 50 anys	Anual	NTUA http://www.e3mlab.ntu.a.gr
MARKAL/TIMES	Global/regional/ Nacional/local	<i>Bottom-up/</i> Optimització/ Equilibri econòmic parcial	Fins l'any 2100	Definits per l'usuari	ETSAP, IEA http://etsap.org
LEAP	Global/ regional/ nacional/local	<i>Bottom-up/</i> Comptabilitat/ Optimització	Il·limitat	Anual	SEI http://www.energycommunity.org
Energy PLAN	Regional/ nacional/local	<i>Bottom-up/</i> Optimització	1 any ³	Horari	Aalborg University http://www.energyplan.eu

Taula 1.2. Característiques principals dels models d'energia presentats

GCAM

Conegut anteriorment com a MiniCam, el model GCAM (*Global Change Assessment Model*) es desenvolupa al *Joint Global Change Research Institute* (JGCRI) del *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL), el qual el distribueix de forma gratuïta.

GCAM és un model d'equilibri econòmic parcial que representa el món en 14 regions. Funciona amb un interval temporal de cinc anys, des de 1990 fins a 2095 i està especialment dissenyat per examinar canvis a llarg termini en el sector energètic, l'ús del sòl i el clima. Assumpcions sobre el creixement poblacional i la productivitat guien l'evolució de l'ús del sòl i l'energia, utilitzant nombroses opcions tecnològiques per proveir els serveis energètics demandats. Els escenaris resultants del model inclouen projeccions de l'abastiment i demanda d'energia i dels gasos d'efecte hivernacle resultants, examinant els seus efectes en el canvi climàtic i el nivell del mar.

El model energètic genera i transforma l'energia que s'utilitza en el parc d'edificis, la indústria i el transport. La generació està limitada per la disponibilitat de recursos, variable segons les regions. Els combustibles fòssils són considerats recursos finits, així com el vent, el sol, l'aigua i la geotèrmia, recursos renovables. La biomassa també es considera renovable, però al seu temps dependent del model d'agricultura i ús del sòl. Els costos d'extracció de recursos creixen a mesura que aquests s'esgoten, disminueixen amb l'aparició de noves tecnologies d'extracció i poden créixer o disminuir dependent dels costos ambientals (JGCRI/PNNL, 2012).

GCAM ha estat utilitzat per analitzar la viabilitat d'estabilitzar les emissions de GEH l'any 2100, investigar les potencialitats del sector del transport en la reducció d'emissions i

³Només és capaç de generar els resultats per un any determinat. Vàries simulacions poden ser combinades per tal de construir escenaris amb l'horitzó temporal desitjat

en l'estudi de requeriments tecnològics i econòmics en diferents escenaris d'estabilització de GEH (Connolly et al., 2010).

MESSAGE

El model MESSAGE (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environment impact*), es desenvolupa per l'*International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) d'Àustria, des de 1980, i és gratuït per a finalitats acadèmiques.

MESSAGE és un model d'optimització utilitzat per l'anàlisi de polítiques energètiques, desenvolupament d'escenaris i planificació energètica a mig i llarg termini. El model aporta un marc per descriure el sistema energètic amb totes les seves interdependències des de l'extracció de recursos, importacions, exportacions, conversions, transport i distribució fins als usos de l'energia com la climatització, il·luminació, processos industrials i transport. El model construeix l'escenari resultant sota la consigna de minimitzar els costos totals del sistema tenint en compte les restriccions imposades per l'usuari. Partint de la informació aportada, mostra l'evolució del sistema energètic des de l'any base, analitzant aspectes com la capacitat de les tecnologies instal·lades, entrades i sortides d'energia, requeriments d'energia a diferents nivells del sistema energètic, costos, emissions, etc. El nivell de detall tecnològic en la representació d'un sistema energètic és flexible i depèn de l'abast geogràfic i temporal del problema analitzat. Una aplicació bàsica del model es construeix especificant les característiques principals de les tecnologies aplicades i definint el Sistema Energètic de Referència a ser utilitzat com a punt de partida de l'anàlisi (veure Fig. 1.4). En el transcurs de la simulació, MESSAGE determina les tecnologies i recursos actuals que cal utilitzar per satisfer la demanda final, amb l'objectiu de minimitzar els costos totals del sistema i tenint en compte les restriccions imposades (IIASA, 2012).

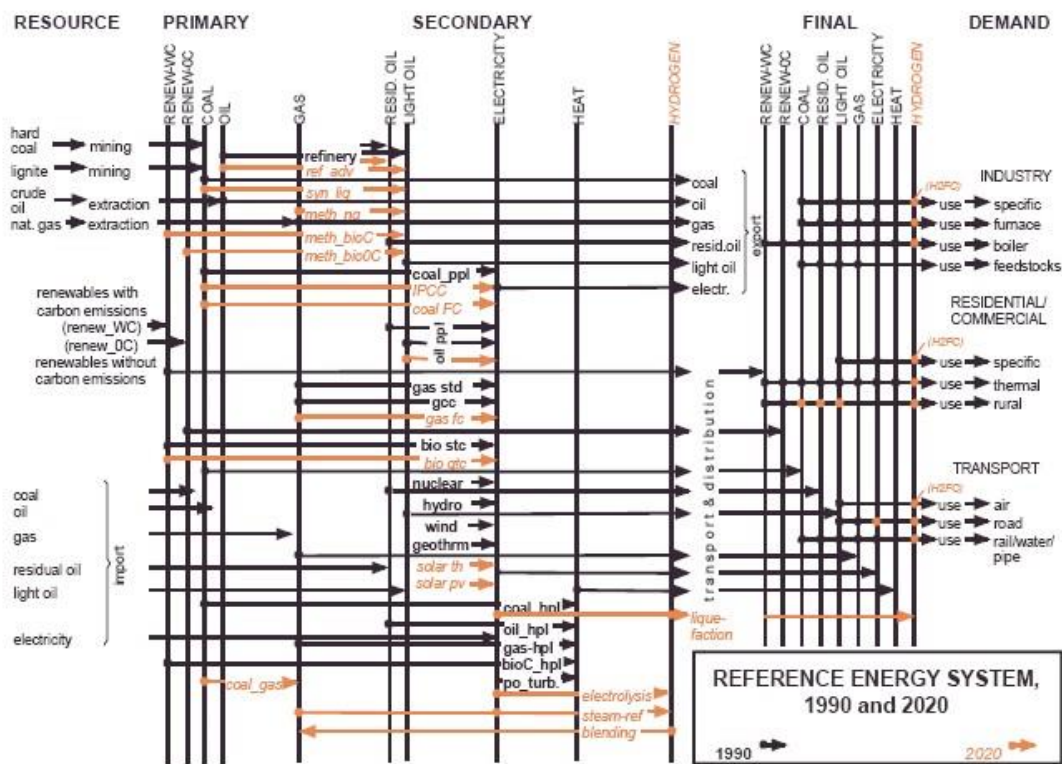


Fig. 1.4. Esquema de l'estructura d'un sistema energètic bàsic del model MESSAGE. Font: IIASA (2012)

El model global MESSAGE està format per 11 macro-regions (Amèrica del Nord, Europa Oest, Pacífic OCDE, Europa Est i Centre, Nous estats independents, Planificació Centralitzada Àsia i Xina, Àsia Sud, Altres Àsia Pacífic, Orient Mitjà, Amèrica Llatina i Carib, Àfrica subsahariana) i té un horitzó temporal fins l'any 2100, en intervals de 10 anys.

Les aplicacions principals del model MESSAGE són a nivell global, com els escenaris de transició energètica global del *World Energy Council* i els escenaris d'emissions de GEH de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). En menor mesura però, també ha estat aplicat a més petita escala, com els estudis nacionals d'innovació del sector elèctric iranià, l'anàlisi de les opcions d'abastiment d'energia als estats bàltics i el pla de l'energia sostenible a Cuba (Connolly et al., 2010).

PRIMES

PRIMES és un model d'equilibri econòmic parcial, desenvolupat des de 1994 per la Universitat Tecnològica Nacional d'Atenes (NTUA). Representa el sector energètic en la seva totalitat, incloent tant la demanda com l'abastiment d'energia. Aquest model combina l'enfocament *top-down* i *bottom-up* en mòduls separats per a cada sector de demanda i

abastiment energètic. El model PRIMES simula els 28 estats membres de la Unió Europea (UE) així com els candidats a formar-ne part i els països veïns (Noruega, Suïssa, Turquia i Sud-Est d'Europa). Simula condicions d'equilibri en el mercat d'abastiment i demanda d'energia dels estats membres de la UE. Determina l'equilibri ajustant els preus de cada forma d'energia, tenint en compte la quantitat de recursos i el que els usuaris finals estan disposats a pagar pels serveis energètics. Aquest model cobreix l'horitzó a mitjà i llarg termini i reflecteix consideracions sobre els mercats econòmics, l'estructura del sector industrial i polítiques i regulacions mediambientals.

El model ha estat utilitzat per a la realització d'un pla d'acció contra el canvi climàtic i desenvolupament de les energies renovables en el context de la UE. A nivell nacional s'ha aplicat en l'avaluació de mesures i polítiques energètiques dels Estats Membres, així com també es utilitza per companyies privades (Connolly et al., 2010).

MARKAL/TIMES

L'acrònim MARKAL, respon a *Market Allocation*. Aquest model va ser desenvolupat durant un període de dues dècades en el marc d'un projecte internacional liderat per l'*Energy Technology Systems Analysis Programme* (ETSAP) de l'Agència Internacional de l'Energia.

MARKAL és un model matemàtic construït amb un alt nivell de detall tecnològic, amb la possibilitat de representar diferents nivells d'escala espacial i dissenyat per estimar la dinàmica del sistema energètic a mitjà i llarg termini, integrant factors econòmics i ambientals. La demanda de serveis energètics es estima basant-se en projeccions econòmiques i demogràfiques. El model té en compte les característiques de les tecnologies actualment disponibles així com les seves potencialitats futures. Implementat com a model d'optimització, té per objectiu oferir els serveis energètics al mínim cost, mitjançant inversions d'equipament tecnològic, l'operació del sistema energètic i decisions sobre l'abastiment d'energia primària. MARKAL calcula l'equilibri parcial intertemporal en els mercats energètics ajustant la corba d'abastiment i la corba de demanda condicionades per la quantitat i el preu dels recursos energètics. Tal com es mostra en la Fig. 1.5, en el punt d'equilibri, l'abastiment d'energia coincideix exactament amb la quantitat demandada pels consumidors (Loulou et al., 2004).

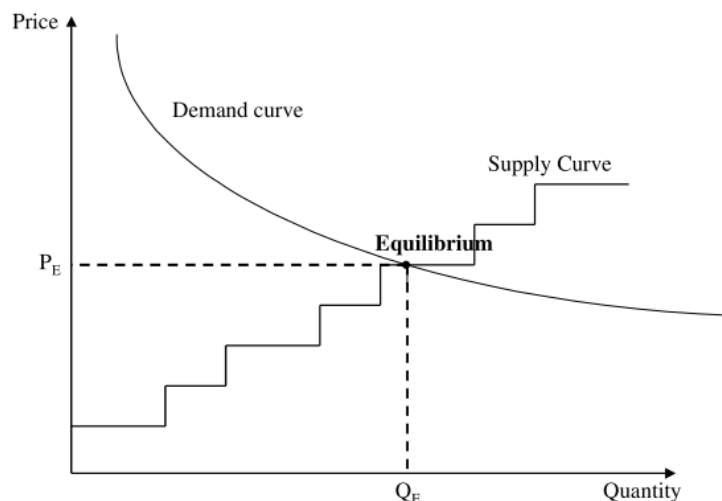


Fig. 1.5. Equilibri en el cas d'un servei energètic. Font: Loulou et al. (2004)

MARKAL disposa de múltiples opcions per modelitzar característiques específiques del sector energètic, com la internalització d'externalitats, la representació de l'aprenentatge tecnològic de forma endògena i la simulació de la incertesa en alguns dels paràmetres del model.

Des de l'any 2008, el comitè de l'ETSAP va decidir promoure l'evolució del model TIMES (*The Integrated MARKAL-EFOM⁴ System*), tot i que MARKAL segueix sent una opció a utilitzar pels usuaris que així ho desitgin. TIMES està basat en el paradigma de modelització de MARKAL, tot i que incorpora diferències significatives respecte aquest. Loulou et al. (2005) en resumeix les principals diferències, destacant en TIMES la inclusió d'equacions per analitzar el canvi climàtic o la capacitat de TIMES de definir l'interval temporal en períodes desiguals de temps. Aquesta última característica permet una representació més flexible de l'horitzó temporal, permetent adoptar períodes reduïts en el curt termini i més prolongats en horitzons més llunyans.

TIMES ha estat aplicat a multitud de projectes de diferent escala, des de la global, com l'ETSAP-TIAM (*Times Integrated Assessment Model*), fins a projectes d'abast nacional (TIMES-Portugal, TIMES-Norway, TIMES-Spain). La Comissió Europea utilitza TIMES per l'avaluació de la *Renewable Energy Strategy 2020* (RES2020⁵), inicialment a través del model PET (*Pan European TIMES*) i recentment mitjançant el model JRC-EU-TIMES (Simoes et al., 2013).

⁴ EFOM (*Energy Flow Optimization Model*) és un model *bottom-up* en el qual TIMES es basa.

⁵ <http://www.cres.gr/res2020/>

LEAP

LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning system*) és un model integrat de planificació energètica, àmpliament utilitzat en l'anàlisi de polítiques energètiques i de mitigació del canvi climàtic, desenvolupat per l'*Stockholm Environment Institute* (SEI).

LEAP no representa un sistema energètic concret sinó que aporta la flexibilitat suficient per a crear models que s'ajustin a l'estructura de dades de les quals disposa cada usuari. Tot i que en essència LEAP és un model de comptabilitat *bottom-up*, suporta diferents metodologies de modelització. En l'àmbit de la demanda permet la modelització amb un enfocament macroeconòmic *top-down*. En l'àmbit de l'abastiment d'energia, proporciona una gamma de metodologies de comptabilitat i de simulació per modelitzar la generació elèctrica i planificar l'expansió de la capacitat instal·lada, permetent incorporar dades de models més especialitzats. A partir de la versió LEAP2011 incorpora un mòdul d'optimització lineal de la xarxa elèctrica basat en el programari de codi obert OSeMOSYS⁶ (SEI, 2011). També inclou un mòdul de modelització d'existències (*stock-turnover*) per àrees específiques com el transport, on pot ser interessant representar en detall com evoluciona l'eficiència del parc automobilístic en funció de les vendes de nous vehicles i la substitució progressiva dels més antics.

LEAP pretén ser una eina per analitzar escenaris a mitjà i llarg termini (típicament períodes d'entre 20 i 50 anys), tot i que no existeix una limitació en aquest aspecte. La major part dels seus càlculs es realitzen amb un interval temporal d'un any, excepte alguns resultats que poden ser calculats amb un major nivell de detall. Per exemple, en els càlculs referents al sector elèctric, l'interval temporal pot ser dividit en unitats més petites, per tal de representar estacions, tipus de dies i inclús certes hores del dia. Els escenaris resultants són relats que expliquen com el sistema energètic pot evolucionar en funció de les assumpcions establertes. Aquests poden ser comparats segons requeriments d'energia, costos, beneficis socials i impactes mediambientals. Mesures polítiques particulars poden ser definides i posteriorment combinades per obtenir escenaris alternatius integrats. Aquest enfocament permet avaluar polítiques individuals així com també les interaccions que apareixen en combinar múltiples mesures i polítiques. Per exemple, els beneficis d'aplicar estàndards d'eficiència energètica combinats amb la introducció d'energies renovables poden ser inferiors que la suma dels beneficis d'ambdues accions avaluades de forma separada.

⁶ *Open Source Energy Modelling System* (<http://www.osemosys.org/>)

Altres característiques destacades de LEAP són la simplicitat i transparència dels càlculs interns que realitza, així com el baix requeriment de dades per tal de poder realitzar anàlisis inicials. Aquesta flexibilitat permet partir d'anàlisis simples, i a mesura que la disponibilitat de dades augmenta s'afegeix detall i complexitat en el model per aprofundir en les qüestions a abordar.

La planificació energètica nacional és segurament l'aplicació més generalitzada de LEAP, amb estudis publicats a Xina (Guo et al., 2003), Estònia (Dementjeva and Siirde, 2010), Japó (Takase and Suzuki, 2011), Taiwan (Huang et al., 2011) i Grècia (Roinioti et al., 2012). També s'ha emprat en l'anàlisi de sectors específics del sistema energètic, principalment en el sector elèctric, com és el cas de Xina (Cai et al., 2007), Korea (Foxon et al., 2013) i Turquia (Özer et al., 2013). Altres aplicacions destacades de LEAP estudien en detall àmbits concrets com el sector residencial (Kadian et al., 2007) o els impactes de la introducció del vehicle elèctric (Dias et al., 2014). En el primer article fent ús de l'eina d'optimització lineal integrada en les versions més recents de LEAP, Rogan et al. (2013) exploren l'escenari òptim d'abastiment d'energia elèctrica a Irlanda. Per últim, tot i que generalment LEAP es utilitza per l'anàlisi de sistemes energètics nacionals, també s'han desenvolupat aplicacions a escala global (Nilsson et al., 2012).

EnergyPLAN

El model EnergyPLAN es desenvolupa des de 1999 a la Universitat d'Aalborg, Dinamarca. L'objectiu principal del model és donar suport al disseny de plans estratègics d'energia basant-se en l'anàlisi tècnic i econòmic del sector energètic nacional. No obstant, el model també pot ser aplicat a escala regional i local. És un model determinístic d'entrada sortida amb un alt nivell de representació i detall de les tecnologies.

EnergyPLAN optimitza el funcionament del sistema en termes de costos totals anuals, tenint en compte els costos de les inversions, l'operació i manteniment, el període de vida i els tipus d'interès. Les característiques bàsiques del sector energètic representat en el model es mostren en el diagrama de la Fig. 1.6. Les entrades principals són la demanda, les fonts d'energia renovable, la capacitat de les centrals d'abastiment d'energia, els costos, un bon nombre d'estratègies opcionals de regulació d'importacions i exportacions i l'excés de producció d'energia elèctrica. Les sortides aporten balanços d'energia i resultats anuals de generació, consum d'energia, emissions de CO₂, importacions, exportacions i costos totals, incloent la despesa en intercanvis d'electricitat.

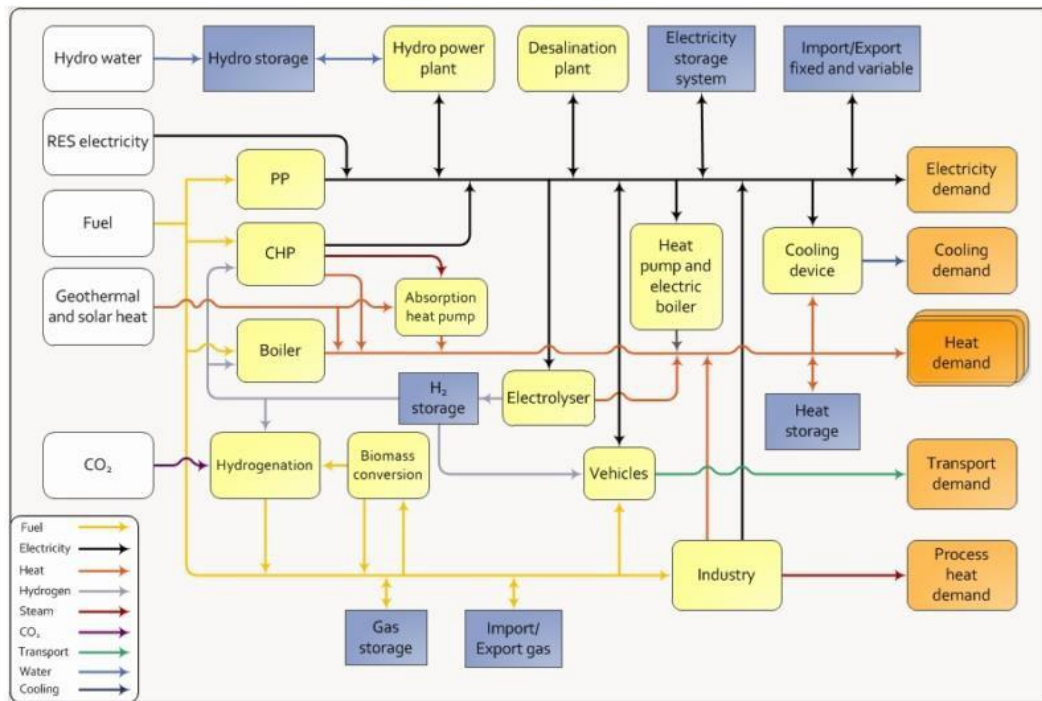


Fig. 1.6. Diagrama representatiu del sector energètic en el model EnergyPLAN. Font: Lund (2013)

El disseny de l'EnergyPLAN fa èmfasi en l'anàlisi del sistema energètic en conjunt, buscant abordar reptes actuals dels sistemes energètics moderns com la integració de les fonts d'energia renovables a la xarxa elèctrica mitjançant l'ús de xarxes intel·ligents (Lund, 2013).

EnergyPLAN ha estat utilitzat en estudis d'integració d'energies renovables a gran escala, l'estudi de combinacions òptimes de fonts d'energia renovables i la gestió de l'excedent d'electricitat (Connolly et al., 2010). També s'han realitzat estudis en el sector del transport i la possibilitat de ser abastit mitjançant energies renovables (Mathiesen et al., 2008). Finalment, a escala nacional s'ha analitzat la viabilitat de disposar de sectors energètics 100% renovables, amb casos d'estudi a Dinamarca (Lund and Mathiesen, 2009) i Irlanda (Connolly et al., 2011).

Els models exposats en aquesta secció poden ser utilitzats per exercicis de planificació energètica i anàlisi d'escenaris a diferents escales. Tot i això, és important escollir el model que s'adeqüi millor al propòsit de l'estudi que es pretén abordar i a les característiques d'aquest: àrea geogràfica que es vol cobrir, abast dels escenaris, disponibilitat de dades, sectors a representar, detall de les tecnologies, etc. Específicament, si l'objectiu és modelitzar sistemes energètics 100% renovables, de les eines exposades, únicament LEAP i

EnergyPLAN ho han realitzat prèviament, amb la diferència que el segon disposa de més nivell de resolució temporal pel que és més adequat per abordar les fluctuacions de les principals fonts en estudis d'integració d'energies renovables. D'altra banda, si l'objectiu és construir escenaris a llarg termini que conduïxin cap a sistemes 100% renovables, LEAP seria més adequat degut al major abast temporal (Connolly et al., 2010).

Finalment, Gargiulo & Gallachóir (2013) assenyalen l'ús del sòl i la representació del comportament social, com les dues àrees menys desenvolupades i per tant que requereixen d'atenció especial en els models d'energia actuals. L'ús del sòl per a fins energètics crea un vincle entre energia i agricultura, i genera el debat entre alimentació i abastiment energètic. Per la seva banda, el comportament social respecte l'ús de l'energia representa la dimensió més desconeguda fins al moment, assumint en la major part dels models una resposta racional als canvis de preu de l'energia. En aquest sentit, un repte clau pels futurs models d'energia, és el desenvolupament de mètodes quantitius per incorporar anàlisis científics de comportament social.

1.1.4 Perspectives en seguretat energètica

La seguretat energètica és un dels principals objectius de la política energètica a totes les escales. No obstant, el terme no està clarament definit, la qual cosa dificulta la mesura i la comparativa amb altres objectius polítics (Winzer, 2012). A més, l'especificitat del terme dins l'àmbit de l'energia, pot portar a situar-la únicament en un marc tècnic i molt particular del sector energètic. Val a dir però, que després d'un període en que aquesta s'associava principalment a la geopolítica del petroli, en l'actualitat s'analitza des de perspectives que integren diferents disciplines, apropant-se així a la visió holística de la sostenibilitat (Stahel et al., 2009).

La primera meitat del segle XX, marcada per dues guerres mundials, fa que el concepte de seguretat energètica neixi íntimament lligat a la noció d'abastiment de petroli destinat al sector armamentístic. Finalitzada la Segona Guerra Mundial, el context de Guerra Freda manté la importància del petroli per sostenir els exèrcits i es converteix també en una eina vital en la major part dels àmbits de les societats industrialitzades. Així, la dependència del petroli s'estén a sectors estratègics com el transport, però també a molts altres com la producció d'aliments, la salut, la generació elèctrica, etc. La crisi del petroli de 1973 mostra la vulnerabilitat del sistema front als principals països productors i conduïx als països industrialitzats a adoptar una sèrie d'estratègies per a fer-hi front: (1) control polític i militar de les principals regions productores, (2) foment d'un mercat global de productes petrolífers, evitant concentrar el poder en un únic actor i (3) creació de l'Agència

Internacional de l'Energia (IEA, per les seves sigles en anglès) per coordinar respostes dels països de l'OCDE (Organització de Cooperació i Desenvolupament Econòmic) a futures crisis energètiques. També s'estimula la producció de petroli en regions occidentals com Canada, Alaska i el Mar del Nord i es fomenta la diversificació cap a altres fonts d'energia (principalment nuclear i gas). Tot i l'efecte pal·liatiu d'aquestes mesures en els anys posteriors, la preocupació per la seguretat d'abastiment segueix tan viva com als anys setanta. Avui dia, els contratemps en el proveïment de petroli encara tenen la capacitat de paralitzar l'economia de la major part de nacions, i a més, en l'actualitat, aquest assumpte s'ha estès també a l'abastiment de gas i urani. En resum, el discurs principal dels últims cent anys entorn a seguretat energètica ha estat guiat per l'objectiu d'assegurar l'abastiment de petroli i altres combustibles als països industrialitzats per poder fer front a la creixent demanda de serveis energètics.

Una nova línia de pensament en seguretat energètica emergeix a la dècada dels anys vuitanta degut al creixent interès en els problemes de caire global. La publicació *The Limits to Growth* (Meadows et al., 1972) esperona el debat entorn als límits del planeta i l'esgotament dels recursos naturals. En aquest període, el pic del petroli –o *peak oil*– irromp en el debat al que poc després entraria també el canvi climàtic. Un factor que també contribueix a que les ciències naturals i l'enginyeria entrin de ple en l'anàlisi de la seguretat energètica és l'aparició del concepte de vulnerabilitat dels sistemes tècnics complexos. Aquesta idea s'orienta principalment en la xarxa elèctrica, assenyalant-la com a vulnerable degut a que es basa en la generació centralitzada a gran escala i sustentada majoritàriament per combustibles finits (Rosas-Casals et al., 2007). Aquesta vulnerabilitat es fa visible amb accidents en centrals nuclears com a Chernobyl (1986) o més recentment a Fukushima (2011). La creixent complexitat dels sistemes energètics i la dependència d'accés ininterromput a l'energia de les societats industrialitzades, provoca que a partir d'aquest període es concentrin esforços en fer més robust el sistema front a sabotatges, atacs terroristes, desastres naturals o fallades tècniques. Així doncs, el segon corrent en seguretat energètica, introdueix disciplines tècniques i científiques en una escena dominada fins al moment per l'anàlisi geopolític.

L'últim corrent de pensament en seguretat energètica neix amb el procés de desregulació de l'abastiment d'energia iniciat per molts països a partir dels anys vuitanta. Passar a entendre l'energia com una mercaderia enlloc d'un bé públic incrementa la rellevància dels anàlisis de tipus econòmic. A partir d'aquest moment, al concepte clàssic de disponibilitat de recursos se li afegeix el d'assequibilitat, i la diversificació es presenta com el principal camí a seguir per protegir-se front a inestabilitats en el mercat de l'energia. En el context de

la seguretat energètica s'entén la diversificació com a múltiples opcions quant a combustibles, tecnologies, regions productores, interessos industrials i infraestructures.

Tal com s'ha vist fins al moment, tres contextos històrics ben diferenciats marquen les visions actualment dominants de la seguretat energètica. Cherp & Jewell (2011) identifiquen els diferents corrents de pensament i els defineixen com les tres perspectives en seguretat energètica: sobirania, robustesa i resiliència (veure Taula 1.3).

Perspectiva	Sobirania	Robustesa	Resiliència
Arrels històriques	Subministrament de petroli durant períodes de guerra i la crisi del petroli de 1973	Grans accidents, apagades elèctriques, preocupacions sobre l'escassetat de recursos	Liberalització dels sistemes energètics
Principals riscos pels sistemes energètics	Accions intencionades per part d'agents malèvols	Factors com sabotatges, atacs terroristes, desastres naturals o fallades tècniques	Factors diversos i parcialment imprevisibles
Mecanismes principals de protecció	Control sobre els sistemes energètics. Acords institucionals per evitar accions perturbadores	Millora de la infraestructura i transició cap a recursos més abundants	Millorar la capacitat de resistir i recuperar-se a problemes en el sistema energètic
Disciplina acadèmica	Estudis en seguretat, relacions internacionals, ciències polítiques	Enginyeria, ciències naturals	Economia, anàlisi de sistemes complexos

Taula 1.3 Les tres perspectives en seguretat energètica. Font: Cherp & Jewell 2011

Els problemes relacionats amb l'abastiment de petroli, inicialment per usos militars i a posteriori per al sector del transport, conformen la *sobirania*, perspectiva històricament arrelada als estudis estratègics en seguretat i a les teories en relacions internacionals i les ciències polítiques. Les estratègies de minimització de riscos en aquest camp estan enfocades a la realització d'acords amb exportadors de confiança, la substitució de recursos importats per fonts energètiques domèstiques i al control polític i militar de les principals regions productores.

La importància creixent de l'energia en general i de l'electricitat en particular, condueix al repte polític d'assegurar el bon funcionament dels sistemes tècnics cada vegada més sofisticats. Juntament amb l'emergent preocupació pels límits del planeta i el canvi climàtic condueixen al naixement d'una nova perspectiva lligada a l'enginyeria i les ciències naturals: la *robustesa*. Les estratègies de protecció front als nous riscos percebuts inclouen la millora de les infraestructures, la transició cap a fonts d'energia més abundants, l'adopció de tecnologies més segures i la gestió del creixement de la demanda.

Finalment, l'establiment de mercats d'energia no regulats centra l'interès en l'anàlisi de les inversions a llarg termini, estimulant els estudis de disciplines acadèmiques com l'economia i la ciència de la complexitat. Com a resultat apareix la *resiliència*, l'última perspectiva a integrar-se al camp d'estudi de la seguretat energètica. Aquesta, entén el futur com a impredecible i incontrolable degut a l'alta complexitat, incertesa i no-linealitat dels sistemes energètics, mercats, tecnologies i societats. A diferència de les altres perspectives, la resiliència no es centra en analitzar, quantificar o minimitzar els riscos inherents dels sistemes energètics. En el seu lloc, busca estar preparats front a possibles sorpreses, millorant característiques genèriques dels sistemes energètics (flexibilitat, adaptabilitat, diversitat) que aportin protecció front a amenaces i riscos imprevisibles.

En l'actualitat, no solament aquestes tres perspectives es solapen, sinó que les solucions i estratègies per afrontar la seguretat energètica han de ser cada vegada més integrades. En un context de transició energètica com l'actual, les interaccions entre els diferents reptes que afronta la seguretat energètica marquen l'agenda política actual i requereixen d'un nou nivell d'integració de les tres perspectives. La Fig. 1.7 mostra el marc en seguretat energètica definit per Cherp & Jewell (2011), els riscos associats a cada perspectiva i les respostes de protecció, que en la majoria dels casos tendeixen a integrar diferents perspectives.

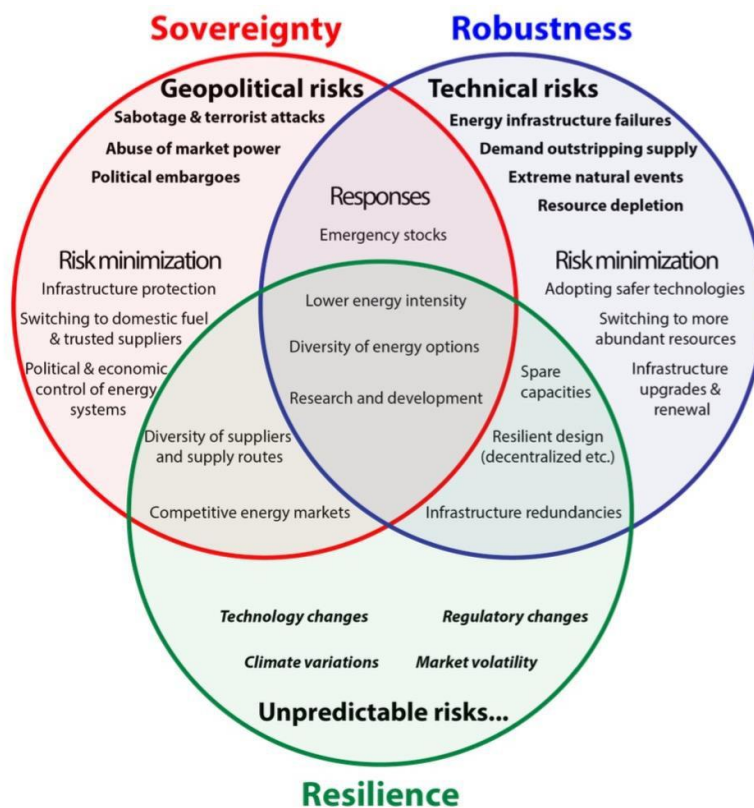


Fig. 1.7. Perspectives en seguretat energètica. Font: Cherp & Jewell 2011

Tot i que, tal com s'ha comentat, no existeix una definició única, un gran nombre d'aproximacions al concepte de seguretat energètica fan especial èmfasi en la reducció de vulnerabilitats dels sistemes energètics (veure compendi de Winzer (2012)). La visió de la Comissió Europea (2000) recull en bona mesura les diferents perspectives esmentades en aquesta secció, i s'aproxima també a l'objectiu general que es fixa aquesta tesi en el marc d'Andorra: "L'estratègia en seguretat d'abastiment energètic⁷ de la UE ha de tractar d'assegurar, pel benestar dels ciutadans i el bon funcionament de l'economia, la disponibilitat física i continuada de productes energètics en el mercat a un preu assequible per a tots els consumidors (particulars i industrials), dins el respecte de les exigències ambientals i sota una perspectiva de desenvolupament sostenible". I afegeix: "la seguretat d'abastiment no pretén maximitzar l'autonomia energètica o minimitzar la dependència, sinó reduir els riscos derivats d'aquesta última".

1.2 Objectius de la tesi

1.2.1 Objectiu general

El principal objectiu d'aquesta tesi és donar suport analític a la definició del model energètic actual i futur d'Andorra, prioritzant garantir el subministrament energètic en condicions respectuoses amb la societat, el medi ambient i compatibles amb el desenvolupament econòmic del país.

1.2.2 Objectius específics

- 1) Avaluació de la seguretat energètica del Principat d'Andorra des d'una perspectiva integrada
 - a. Definir el marc d'avaluació de la seguretat energètica a Andorra.
 - b. Selecció d'indicadors aplicables a la realitat andorrana.
 - c. Avaluació de l'estat actual.
 - d. Identificació d'estratègies de millora.
 - e. Avaluació de l'estat futur en funció dels escenaris estudiats.

- 2) Implementació d'un model integrat d'avaluació de la seguretat energètica del Principat d'Andorra

⁷ En aquest cas, i en molta altra literatura, el concepte seguretat d'abastiment energètic es utilitza com a sinònim de seguretat energètica

- a. Selecció de l'eina base per a la implementació del model.
 - b. Modelització del consum energètic.
 - c. Modelització de l'abastiment d'energia.
 - d. Integració dels indicadors de seguretat energètica en el model.
- 3) Modelització detallada del sector del transport
- a. Anàlisi del consum energètic de diferents tecnologies de vehicles en zones de muntanya.
 - b. Implementació d'un model d'estoc del parc automobilístic andorrà.
 - c. Escenaris de l'evolució futura del parc automobilístic i els seus impactes.
 - d. Avaluació de l'impacte d'un canvi massiu en el model de transport, de combustibles fòssils a l'energia elèctrica.
- 4) Anàlisi d'escenaris a llarg termini per l'avaluació de polítiques energètiques
- a. Construcció d'escenaris exploratoris i normatius representant els costos econòmics i les externalitats.
 - b. Estudi de la potencialitat de mesures polítiques integrades en els principals sectors consumidors d'energia del país, centrades en l'eficiència i l'estalvi energètic.
 - c. Obtenció de l'escenari d'abastiment d'energia elèctrica a llarg termini de mínim cost mitjançant tècniques d'optimització.

1.3 Metodologia

L'eix central de la tesi doctoral consisteix en la implementació d'un model integrat d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra. En paral·lel s'ha treballat el marc conceptual de la seguretat energètica adaptat a la realitat andorrana el qual combinat amb el model permet realitzar l'avaluació de l'estat actual i l'anàlisi dels escenaris futurs resultants.

1.3.1 Marc d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra

Per tal d'avaluar la seguretat energètica actual i futura d'Andorra es segueix la metodologia desenvolupada per Jewell et al. (2014). Aquesta metodologia proposa un marc de referència per avaluar la seguretat energètica d'escenaris d'energia a llarg termini implementats mitjançant models d'avaluació integrada. Jewell et al. (2014) apliquen la metodologia a 43 escenaris globals generats mitjançant el model MESSAGE (veure secció 1.1.3.2), motiu pel qual, en l'aplicació a Andorra s'ha tingut en compte la diferència d'escala i les particularitats del país.

Com a primer pas, es defineix la seguretat energètica com a *baixa vulnerabilitat dels sistemes energètics vitals*. Aquesta és una definició suficientment flexible per poder ser aplicada en diverses situacions i inclou també als sistemes energètics futurs. Encaixa, a més, amb la visió que la seguretat energètica es basa en la reducció de riscos del sistema energètic. S'entén per sistemes energètics vitals, aquells que poden alterar l'estabilitat de la societat en cas de fallida. El segon pas consisteix en definir les vulnerabilitats. Les vulnerabilitats del sistema energètic són la combinació dels riscos als que aquest s'exposa i la seva resiliència. Poden ser físiques (alteracions en els fluxos d'energia) o econòmiques (variacions dels costos i preus de l'energia) i aparèixer de forma sobtada (interrupcions inesperades de curta durada) o per estrès del sistema (apropant-se lentament i conduint a fenòmens de més durada). En aquesta metodologia les vulnerabilitats s'estructuren en forma d'indicadors segons la seva relació amb cada una de les perspectives genèriques en seguretat energètica nascudes durant l'últim segle: sobirania, robustesa i resiliència (veure secció 1.1.4).

1.3.2 Implementació del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica

L'eina integrada de modelització LEAP⁸ ha estat l'escollida per tal de crear el model integrat d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra (anomenat LEAP-Andorra). En aquest model es caracteritzen tots els àmbits del sector energètic així com les seves influències més enllà de les purament relacionades amb l'energia.

Històricament, Andorra no ha seguit una política de recopilació i tractament de dades referents a l'energia. A més, moltes de les existents no són de caràcter públic pel que la disponibilitat de dades en iniciar la recerca era molt limitada. Aquest és un dels motius principals pels quals s'ha escollit LEAP, ja que és una eina capaç de realitzar anàlisis inicials amb un baix requeriment de dades. Aquesta flexibilitat permet partir d'anàlisis simples, i a mesura que la disponibilitat de dades augmenta, afegir detall i complexitat al model. Més enllà d'aquesta tesi, es pretén que el model resultant serveixi d'eina de suport en la presa de decisions als principals actors energètics del país. En aquest sentit, la transparència i facilitat d'ús de LEAP han estat també factors determinants en l'elecció del model.

Des de la perspectiva dels IAMs, una de les debilitats de LEAP és que no integra de forma endògena els efectes en el canvi climàtic de les emissions de CO₂ generades pel propi sistema. Aquest és un factor important en la construcció de models globals o que representin regions amb un pes significatiu en les emissions globals de CO₂, però menys significatiu quan es treballa a escala local.

⁸ En la secció 2.3.2 es detallen les característiques i aplicacions destacades del model LEAP

El model LEAP-Andorra estima l'evolució del sistema energètic andorrà des de l'actualitat fins l'any 2050, amb un interval temporal d'un any⁹. El model combina tècniques de modelització *top-down* i *bottom-up* en funció de les dades disponibles i els objectius plantejats en la caracterització de cadascun dels àmbits del sector energètic. La Fig. 1.8 mostra l'estructura principal del model LEAP-Andorra. La modelització del consum i l'abastiment d'energia, formen els dos mòduls principals del sistema. El model consta d'una sèrie d'assumpcions macroeconòmiques que son tractades com a variables exògenes. Les noves tecnologies es tracten també com a dades d'entrada i les seves característiques actuals i futures (capacitat, eficiència, cost, cicle de vida, emissions) es basen en dades d'organismes internacionals i correccions puntuals pel territori andorrà. En tot moment, el mòdul d'abastiment proporciona l'energia demandada pel sistema recolzant-se en els recursos propis i en les importacions. A més de les variables purament energètiques, els escenaris resultants mostren els GEH com a externalitats ambientals de cadascun dels mòduls. El model permet l'entrada d'estratègies polítiques en cada un dels seus àmbits per tal de construir escenaris alternatius i valorar-ne la seva viabilitat. Les estratègies considerades giren entorn les tres línies prioritàries identificades en el Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra: estalvi, eficiència i energies renovables (Govern d'Andorra, 2012). Per últim, el model integra les diferents perspectives en seguretat energètica a través del càlcul dels indicadors.

⁹ En l'abastiment d'energia elèctrica el model LEAP-Andorra treballa a escala mensual

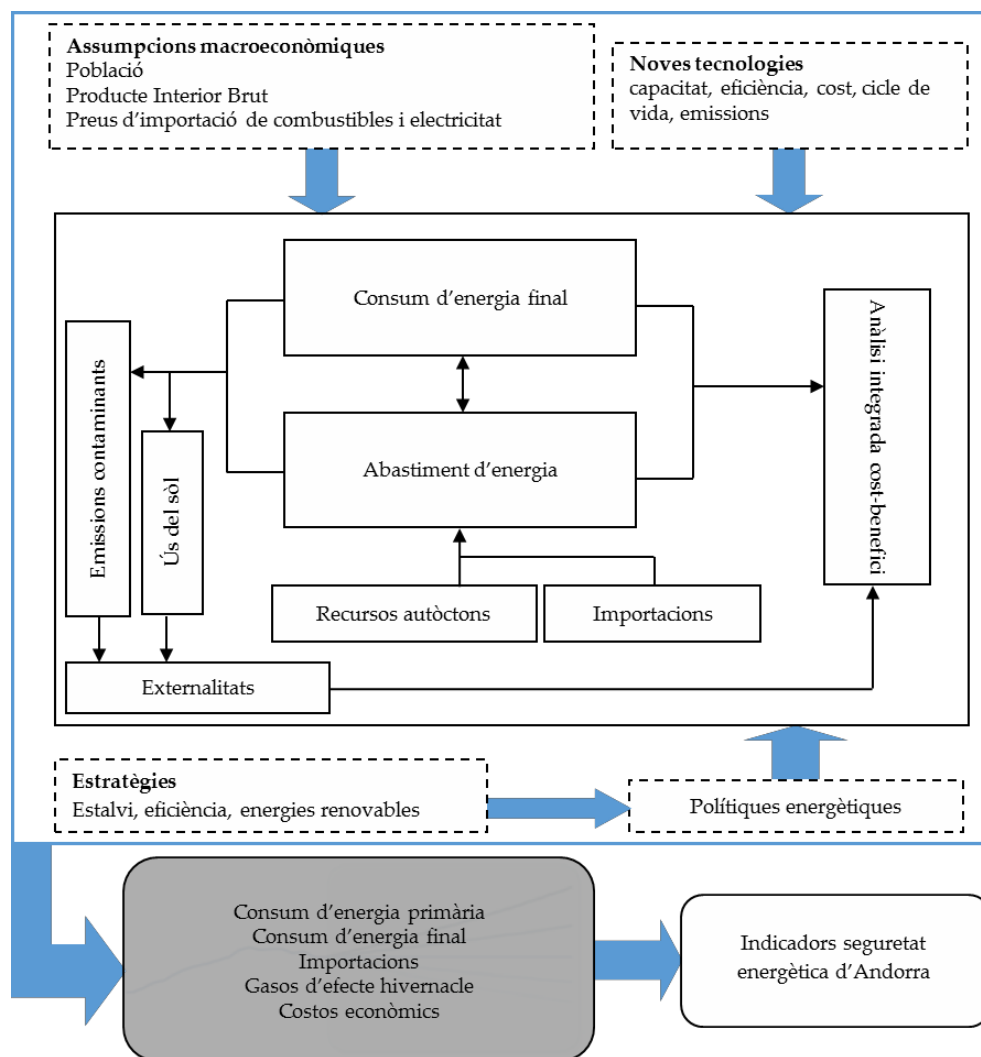


Fig. 1.8. Estructura del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra

1.4 Referències

- Bardi, U., 2013. The Grand Challenge of the Energy Transition. *Front. Energy Res.* 1, 1–4. doi:10.3389/fenrg.2013.00002
- Berger, G., 1964. *Phénoménologie du temps et prospective*. Presses Universitaires de France, Paris.
- Cai, W., Wang, C., Wang, K., Zhang, Y., Chen, J., 2007. Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China's electricity sector. *Energy Policy* 35, 6445–6456. doi:10.1016/j.enpol.2007.08.026

- Cherp, A., Jewell, J., 2011. The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 3, 202–212. doi:10.1016/j.cosust.2011.07.001
- Comissió Europea, 2000. Green paper - Towards a European strategy for the security of energy supply. Brussels.
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V., Leahy, M., 2011. The first step towards a 100% renewable energy-system for Ireland. *Appl. Energy* 88, 502–507. doi:10.1016/j.apenergy.2010.03.006
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V., Leahy, M., 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Appl. Energy* 87, 1059–1082. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.026
- Costanza, R., Leemans, R., Boumans, R., Gaddis, E., 2007. Integrated global models, in: *Sustainability or Collapse? An Integrated History and Future of People on Earth*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 417–446.
- Cunningham, R., 2003. La energí, historia de sus fuentes y transformación. *Petrotecnia* 7.
- Dementjeva, N., Siirde, A., 2010. Analysis of current Estonian energy situation and adaptability of LEAP model for Estonian energy sector. *Energetika* 75–84.
- Dias, M.V.X., Haddad, J., Horta Nogueira, L., Costa Bortoni, E. Da, Passos da Cruz, R.A., Akira Yamachita, R., Goncalves, J.L., 2014. The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System. *Energy Policy* 65, 298–304. doi:10.1016/j.enpol.2013.09.052
- Easterling, W.E., 1997. Why regional studies are needed in the development of full-scale integrated assessment modelling of global change processes. *Glob. Environ. Chang. Part A* 7, 337–356.
- Flechtheim, O.K., 1966. *History and futurology*. Hain.
- Foxon, T.J., Hammond, G.P., Leach, M.A., Pearson, P.J.G., Park, N.-B., Yun, S.-J., Jeon, E.-C., 2013. An analysis of long-term scenarios for the transition to renewable energy in the Korean electricity sector. *Energy Policy* 52, 288–296.
- Gabor, D., 1965. *Inventing the future*. Technion, Israel Institute of Technology.
- Gargiulo, M., Gallachóir, B.Ó., 2013. Long-term energy models: Principles, characteristics, focus, and limitations. *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* 2, 158–177. doi:10.1002/wene.62
- Godet, M., Roubelat, F., 1996. Creating the future: the use and misuse of scenarios. *Long Range Plann.* 29, 164–171.

- Govern d'Andorra, 2015. Contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN) de l'Andorre.
- Govern d'Andorra, 2012. Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra.
- Govern d'Andorra, 2007a. Pla Estratègic de l'Energia d'Andorra 2006-2015.
- Govern d'Andorra, 2007b. Programa Andorra 2020.
- Guo, B., Wang, Y., Zhang, A., 2003. China's energy future: LEAP tool application in China. Vancouver, Canada.
- Huang, Y., Bor, Y.J., Peng, C.-Y., 2011. The long-term forecast of Taiwan's energy supply and demand: LEAP model application. *Energy Policy* 39, 6790–6803. doi:10.1016/j.enpol.2010.10.023
- IIASA, 2012. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE). URL: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/ENE/model/message.html> (accessed 5.12.14).
- Janer, A., 2011. L'Oracle de Delfos. Viatge al gran santuari de l'endevinació grega. *Rev. Sàpiens*.
- Jewell, J., Cherp, A., Riahi, K., 2014. Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices. *Energy Policy* 65, 743–760.
- JGCRI/PNNL, 2012. Global Change Assessment Model. URL: <http://www.globalchange.umd.edu/models/gcam/> (accessed 5.12.14).
- Jouvenel, B., 1967. *The Art of Conjecture*, transl. from French by N. Lary, London: Weidenfeld and Nicolson.
- Jouvenel, H., Roque, M.A., 1993. *Catalunya a l'horitzó 2010*.
- Kadian, R., Dahiya, R.P., Garg, H.P., 2007. Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi. *Energy Policy* 35, 6195–6211. doi:10.1016/j.enpol.2007.07.014
- Knight, O., 2012. *Planning for a Low Carbon Future*. Washington, USA.
- Loulou, R., Goldstein, G., Noble, K., 2004. *Documentation for the MARKAL Family of Models*. Paris.
- Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtila, A., Goldstein, G., 2005. *Documentation for the TIMES Model Part I, IEA Energy Technology Systems Analysis Programme*. Paris.
- Lund, H., 2013. *EnergyPLAN Documentation Version 11.1*. Aalborg, Denmark.

- Lund, H., Mathiesen, B.V., 2009. Energy system analysis of 100% renewable energy systems—The case of Denmark in years 2030 and 2050. *Energy* 34, 524–531. doi:10.1016/j.energy.2008.04.003
- Mackay, J.C., 2009. *Sustainable Energy — without the hot air*. UIT Cambridge, England.
- Malaska, P., 2000. Knowledge and information in futurology. *Foresight* 2, 237–244.
- Mathiesen, B.V., Lund, H., Nørgaard, P., 2008. Integrated transport and renewable energy systems. *Util. Policy* 16, 107–116. doi:10.1016/j.jup.2007.11.007
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., 1992. *Más allá de los límites del crecimiento*. Aguilar.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W., 1972. *The Limits to Growth*. Universe Books, New York.
- Nakata, T., 2004. Energy-economic models and the environment. *Prog. Energy Combust. Sci.* 30, 417–475. doi:10.1016/j.pecs.2004.03.001
- Nilsson, M., Heaps, C., Persson, Å., Carson, M., Pachauri, S., Kok, M., Olsson, M., Rehman, I., Schaeffer, R., Wood, D., van Vuuren, D., Riahi, K., Americano, B., Mulugetta, Y., 2012. *Energy for a Shared Development Agenda: Global Scenarios and Governance Implications*. Stockholm, Sweden.
- Özer, B., Görgün, E., İncecik, S., 2013. The scenario analysis on CO₂ emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006–2030. *Energy* 49, 395–403.
- Ramos-Martín, J., Giampietro, M., Ulgiati, S., 2011. Can we break the addiction to fossil energy? *Ecol. Modell.* 223, 1–3. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.10.024
- Rogan, F., Cahill, C.J., Daly, H.E., Dineen, D., Deane, J.P., Heaps, C., Welsch, M., Howells, M., Bazilian, M., Ó Gallachóir, B.P., 2013. LEAPs and Bounds—an Energy Demand and Constraint Optimised Model of the Irish Energy System. *Energy Effic.* 7, 441–466. doi:10.1007/s12053-013-9231-9
- Roinioti, A., Koroneos, C., Wangensteen, I., 2012. Modeling the Greek energy system: Scenarios of clean energy use and their implications. *Energy Policy* 50, 711–722. doi:10.1016/j.enpol.2012.08.017
- Rosas-Casals, M., Marzo, M., Salas-Prat, P., 2014. Sovereignty, Robustness, and Short-Term Energy Security Levels. The Catalonia Case Study. *Front. Energy Res.* 2, 1–10. doi:10.3389/fenrg.2014.00016
- Rosas-Casals, M., Valverde, S., Solé, R., 2007. Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks. *Int. J. Bifurc. Chaos* 17, 2465–2475. doi:10.1142/S0218127407018531

- Rotmans, J., Asselt, M., 2003. Integrated assessment modelling. *Clim. Chang. An Integr. Perspect.* 239–275.
- Sardar, Z., 2010. The Namesake: Futures; futures studies; futurology; futuristic; foresight-- What's in a name? *Futures* 42, 177–184.
- Schwartz, P., 1991. *The art of the long view*. Currency Doubleday.
- SEI, 2011. Long-range Energy Alternatives Planning System. User Guide for Version 2011. Somerville, USA.
- Simoës, S., Nijs, W., Ruiz, P., Sgobbi, A., Radu, D., Bolat, P., Thiel, C., Peteves, S., 2013. The JRC-EU-TIMES model. Assessing the long-term role of the SET Plan Energy technologies. Luxembourg. doi:10.2790/97596
- Stahel, A., Cendra, J., Canadell, À., Cano, M., Bernal, R., Cucina, M., Lazzarini, B., Lobera, J., 2009. Desarrollo sostenible: ¿Sabemos de qué estamos hablando? -Principios básicos para hablar un mismo lenguaje-, in: II Congreso Internacional de Medida Y Modelización de La Sostenibilidad (ICSMM 09). CIMNE, Barcelona, pp. 1–16.
- Takase, K., Suzuki, T., 2011. The Japanese energy sector: Current situation, and future paths. *Energy Policy* 39, 6731–6744. doi:10.1016/j.enpol.2010.01.036
- Traveset-Baro, O., 2012. Modelització del consum energètic a Andorra. Apunts per a la definició d'un Model Integrat a escala regional. Tesina Final de Màster. <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/21233>
- Van der Heijden, K., 2005. *Scenarios: the art of strategic conversation*. Wiley.
- Weyant, J., Davidson, O., Dowlabathi, H., 1996. *Integrated assessment of climate change: an overview and comparison of approaches and results*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Winzer, C., 2012. Conceptualizing energy security. *Energy Policy* 46, 36–48. doi:10.1016/j.enpol.2012.02.067
- World Commission on Environment and Development, 1987. *Our common future*. Oxford University Press.
- Zemen, M., 1971. Futurology--illusion or reality? *Futures* 3, 6–10.

2

MODELITZACIÓ DE LA DEMANDA ENERGÈTICA

El Capítol 2 detalla la modelització de la demanda del sector energètic en els diferents sectors d'activitat del país. Prèviament, presenta el model LEAP-Andorra i les seves assumpcions macroeconòmiques. Finalment, en la Secció 2.8 es presenten els resultats de l'escenari de referència i l'impacte d'una sèrie de mesures d'estalvi i eficiència energètica.

2.1 Descripció general del model LEAP-Andorra

El model LEAP-Andorra és un model de simulació que combina tècniques *top-down* i *bottom-up* en el mòdul de demanda. Una de les funcions principals del model és quantificar l'impacte d'implementar mesures polítiques en els diferents sectors. Degut a que bona part de polítiques són de caire tècnic i s'apliquen en sub-sectors concrets (p.ex. parc de turismes, calefacció, il·luminació), quan la disponibilitat de dades ho permet, s'ha optat per l'opció *bottom-up*. És el cas del sector residencial, del transport i de l'administració pública, on el nivell de detall de la modelització permet analitzar un bon nombre de polítiques energètiques. Les projeccions de consum d'energia en aquests sectors es basen en les característiques actuals i futures de les tecnologies existents i en l'evolució dels factors macroeconòmics. En els sectors secundari i terciari no es disposa en l'actualitat de dades sobre consum dels diferents sub-sectors o dels diferents serveis energètics, com tampoc sobre les característiques de les tecnologies existents. L'absència d'informació en aquests sectors impedeix l'ús de tècniques *bottom-up* que permetrien explorar l'efecte de polítiques concretes. Tot i aquesta debilitat, els sectors secundari i terciari s'inclouen a través d'una modelització *top-down* per tal d'aportar una visió del conjunt del sistema energètic d'Andorra.

A diferència del mòdul de demanda, l'abastiment d'energia elèctrica inclou a més del mode de simulació, el d'optimització. La Fig. 2.1 mostra l'estructura d'arbre del model LEAP-Andorra representant els mòduls principals (demanda, abastiment, recursos i indicadors) i els diferents sectors que els integren.

Les dades d'entrada del model parteixen sempre que és possible de fonts públiques i es complementen amb dades privades aportades per FEDA i l'OECC. En casos d'inexistència

de dades locals s'ha recorregut a informacions existents en altres països, organismes internacionals o finalment a suposicions o aproximacions.

LEAP-Andorra treballa a escala nacional i amb una resolució temporal d'un any (2015-2050), tot i que en la modelització de la generació elèctrica aquesta augmenta fins a una resolució mensual.

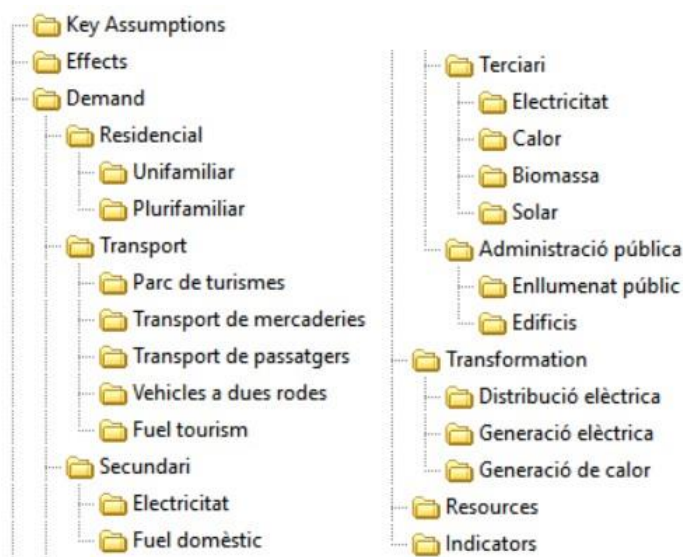


Fig. 2.1. Estructura d'arbre del model LEAP-Andorra

2.1.1 Comptabilització de les emissions de GEH

En línies generals, la comptabilització d'emissions en el model LEAP-Andorra es realitza segons les directrius establertes per l'IPCC en l'àmbit de l'energia (IPCC, 2006). D'acord a la metodologia *Tier 1*, s'han considerat el CO₂, el metà (CH₄) i l'òxid nítrós (N₂O) com les principals emissions de GEH del sistema energètic.

Els valors de potencial d'escalfament global (GWP, per les seves sigles en anglès) dels principals gasos d'efecte hivernacle corresponen als proporcionats pe l'*IPCC Fifth Assessment Report (AR5, 2013)*. Els factors d'emissions considerats dels diferents combustibles es basen en els valors per defecte de la metodologia Tier 1 (veure Taula 2.1).

Combustible	Sector d'aplicació	CO ₂ (kg/TJ)	CH ₄ (kg/TJ)	N ₂ O (kg/TJ)
Fuel domèstic	Residencial, secundari, terciari, adm. pública	74100	10	0,6
Gas butà/propà	Residencial	63100	5	0,1
Gasoil	Transport	74100	3,9	3,9
Gasolina ¹⁰	Transport	69300	33	3,2
Gas Natural Lìquat	Generació elèctrica	64200	3	0,6
Residus	Generació elèctrica	91700	30	4

Taula 2.1. Factors d'emissions dels combustibles utilitzats en el model LEAP-Andorra. Font: IPCC (2006)

Les emissions relatives a l'electricitat es comptabilitzen en el mòdul d'abastiment d'energia elèctrica (Capítol 3 Secció 3.2). Tot i que les directrius de l'IPCC recomanen considerar únicament les emissions referents a la generació local, el considerable pes de les importacions d'electricitat a Andorra (83% del total de demanda elèctrica l'any 2015) obliga a reconsiderar aquest aspecte. En aquest sentit, el LEAP-Andorra té en compte les emissions del mix de generació elèctrica dels països d'on importa electricitat i imputa al sistema energètic andorrà les emissions associades a importacions. Tenint en compte les dades de l'any 2015, el factor d'emissions de l'electricitat importada d'Espanya és de 302 gCO₂/kWh (OCCC, 2016) mentre que el de la francesa de 44 gCO₂/kWh (Rte, 2016).

En la mateixa línia que en el cas de les importacions d'electricitat, en el turisme de carburant (angl., *fuel tourism*¹¹), s'assumeixen variacions respecte les recomanacions tipus de l'IPCC. La diferència en el preu dels carburants amb els països veïns degut a la fiscalitat andorrana provoca que una gran part de les importacions de combustible de locomoció siguin degudes al *fuel tourism*. En aquest cas, les emissions relatives a aquest fenomen no es comptabilitzen en el model ja que aquestes son emeses fora del país.

2.2 Assumpcions macroeconòmiques

2.2.1 Població

L'evolució futura de la població es basa en la projecció publicada en el Primer informe bianual d'Andorra a la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (Miquel et al., 2014). Degut a que l'informe parteix de la població del cens, s'ha aplicat una

¹⁰ Referent a la categoria *Gasoline uncontrolled* (IPCC, 2006)

¹¹ El concepte *fuel tourism*, també conegut amb el nom de *fuel bunkering*, fa referència a combustibles adquirits en una jurisdicció i consumits en una altra, generalment associat al diferencial de preus existents, en aquest cas carburants comprats a Andorra i consumits a Espanya o França

correcció basada en la diferència percentual entre la població registrada i l'estimada l'any 2015 per tal d'evitar una sobreestimació en la població futura. La Fig. 2.2 mostra l'evolució de la població considerada en el model, en la qual es preveu un creixement del 55% fins l'any 2050.

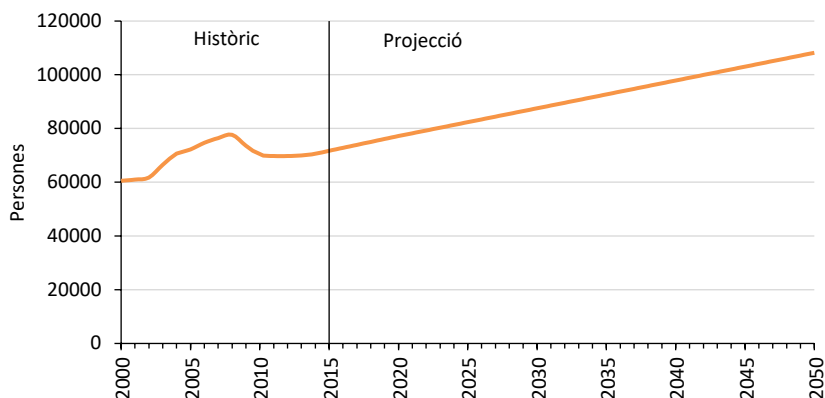


Fig. 2.2. Històric i evolució de la població considerada en el model LEAP-Andorra. Font: Dept. d'Estadística i Miquel et al. (2014)

2.2.2 Producte Interior Brut

L'evolució futura considerada del producte interior brut (PIB) es basa en la projecció publicada en el Primer informe bianual d'Andorra a la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (Miquel et al., 2014). A dia d'avui, igual que en el cas de la població, aquesta és l'única projecció a llarg termini publicada en documents oficials. La Fig. 2.3 en mostra l'històric recent i la projecció fins l'any 2050.

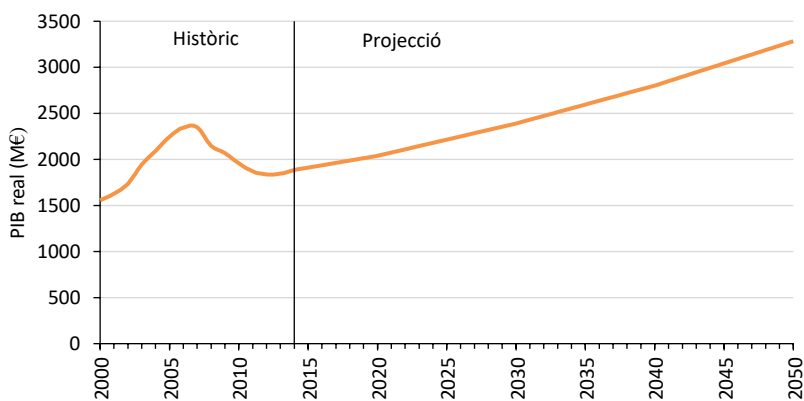


Fig. 2.3. Històric i evolució del PIB real considerat en el model LEAP-Andorra. Font: Dept. d'Estadística i Miquel et al. (2014)

2.2.3 Preu del petroli

L'evolució considerada del preu del petroli està basada en l'escenari de referència de l'*Annual Energy Outlook* (EIA, 2015) referent al petroli Brent. La Fig. 2.4 mostra l'evolució del preu del petroli considerada en el model. Val a dir que la tendència a llarg termini és molt similar a la publicada en l'informe *World Energy Outlook 2015* (IEA, 2015) i a les projeccions de l'*Energy Roadmap 2050* (European Commission, 2011).

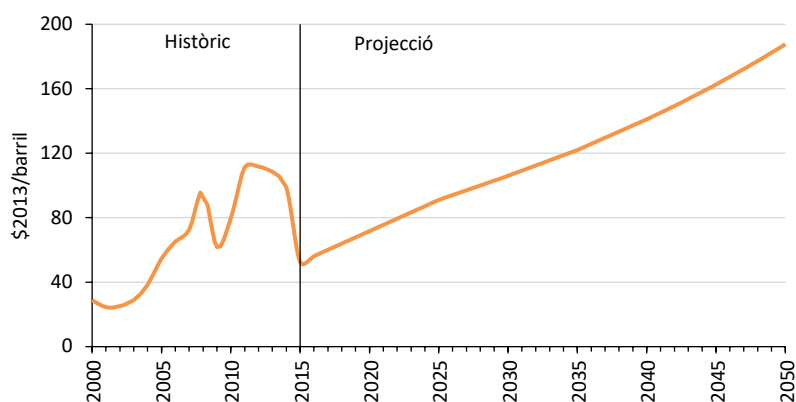


Fig. 2.4. Històric i evolució del preu del petroli en el model LEAP-Andorra. Font: (EIA, 2015)

2.2.4 Visitants

Segons el Programa electoral del partit actualment en el Govern, l'objectiu en nombre de turistes és aconseguir que l'any 2019 el nombre de visitants anuals arribi als nou milions. Tenint en compte les tendències dels últims anys aquest objectiu és aparentment molt ambiciós. De totes maneres, a falta de projeccions en aquest àmbit, en l'escenari de referència (veure Fig. 2.5) es considera que el nombre de visitants incrementarà linealment fins als nou milions i posteriorment s'estabilitzarà. Com es pot observar, no existeix històric de dades previ a l'any 2011 degut al canvi de metodologia en el comptatge per part del departament d'estadística.

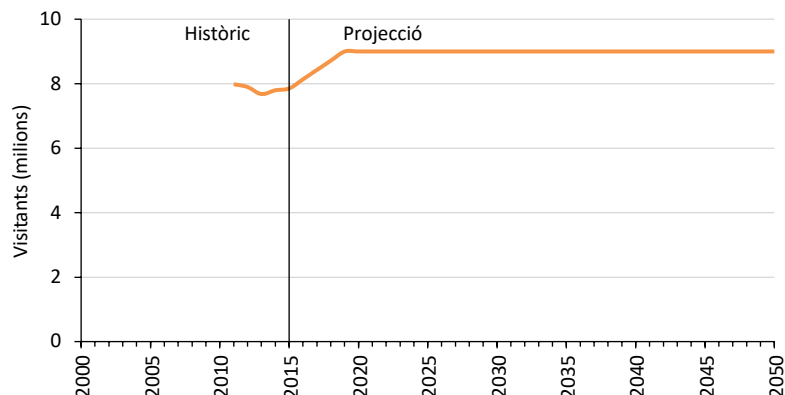


Fig. 2.5. Històric i evolució dels visitants considerada en el model LEAP-Andorra. Font: Dept. d'Estadística

2.3 Sector residencial

2.3.1 Caracterització dels habitatges

L'absència de disponibilitat de cadastre per la totalitat de les parròquies d'Andorra, fa necessària la realització d'una estimació per establir el nombre d'habitatges existents al país. Aquesta s'ha realitzat partint de la dada de població resident al país l'any 2015 juntament amb la dada més actual del nombre de persones per llar extreta de l'Enquesta de Pressupostos Familiars (EPF¹²).

De la totalitat del parc d'habitatges d'Andorra s'ha diferenciat entre llars unifamiliars i plurifamiliars ja que existeixen diferències significatives de patrons de consum energètic entre ambdues tipologies. La proporció de cada tipologia de llar s'extreu de l'EPF de l'any 2012, segons la qual únicament un 8,07% dels habitatges són unifamiliars. La superfície mitjana considerada dels habitatges plurifamiliars és de 83,46 m², valor obtingut a través de les dades de superfície mitjana dels habitatges plurifamiliars construïts des de 1981 (Departament d'Estadística, 2016a). A través d'aquesta dada, conjuntament amb les proporcions de cada tipologia d'habitatge i la superfície mitjana del total de llars aportada per l'EPF de l'any 2012, s'obté l'estimació de superfície mitjana dels habitatges unifamiliars

¹² L'EPF és un sondeig anual adreçat a les llars andorranes del qual es disposa en l'actualitat de dades des del 2005 fins al 2012. Estudia fonamentalment les despeses de consum que són classificades segons la Classificació del Consum Individual per Finalitats (CCIF) i on també s'aborden altres temàtiques, com ara l'habitatge i l'equipament de la llar.

Veure més detall a <http://epf.estadistica.ad/>

(325,61m²). Val a dir que la dada proporcionada per l'EPF inclou jardins i balcons, elements molt presents en llars unifamiliars. És previsible que en aquesta tipologia concreta la superfície a calefactar sigui molt inferior. Per aquest motiu en el model s'estableix en 122 m², considerat en la bibliografia com a valor representatiu de la superfície de referència energètica dels habitatges unifamiliars aïllats (COAA and SaAS, 2012).

El nombre d'habitatges evoluciona en el model en funció de la projecció de població i del nombre de persones per llar, el qual segueix la tendència històrica a la baixa observada en els darrers anys (Fig. 2.6). L'ajust òptim d'aquesta variable és de tipus logarítmic negatiu, de manera que s'obté un valor per a l'any 2050 de 2,26 persones/habitatge. La Taula 2.2 mostra el nombre d'habitatges en l'any base i final del model així com les seves variables conductores (població i persones per llar).

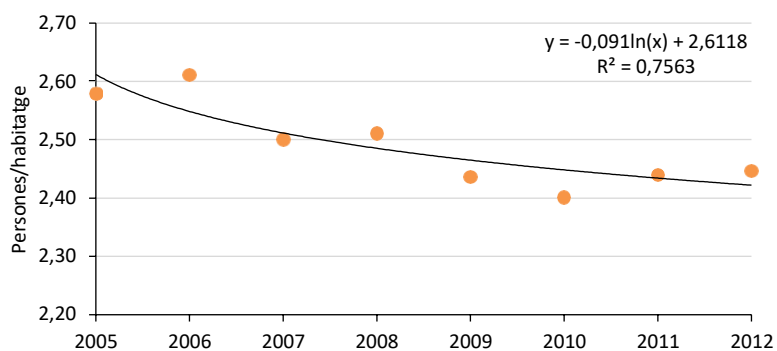


Fig. 2.6. Històric del nombre de persones per habitatge i ajust logarítmic. Font: EPF 2005-2009 i 2010-2012

	2015	2050
Nombre d'habitatges	30013	45786
Població	71732	108193
Persones/habitatge	2,39	2,26

Taula 2.2. Població, persones per habitatge i nombre d'habitatges en l'any base i l'any de finalització del model

Històricament, a Andorra no ha existit cap normativa pròpia que reguli la demanda energètica dels edificis. Així doncs, era pràctica habitual basar-se en normatives dels països veïns en funció de l'origen de la formació dels tècnics que desenvolupaven els projectes. L'any 2010 es publica el *Reglament energètic en l'edificació* (BOPA 57/2010). En aquest reglament es regulen les prestacions energètiques dels edificis de nova planta, les ampliacions i les reformes dels existents i s'introdueixen criteris d'eficiència energètica per contribuir a l'aportació mínima d'energia als edificis mantenint les condicions de confort requerides. Tal com es pot observar en la Fig. 2.7, per tenir en compte la introducció de la nova normativa i els seus efectes en l'àmbit energètic, el model implementat tracta de forma

diferenciada els habitatges existents previs al reglament energètic (variable `habitatges_2010` al model LEAP-Andorra) dels nous habitatges construïts (`habitatges_post_2010`) o renovats (`habitatges_renovats`) després de la introducció del nou reglament.

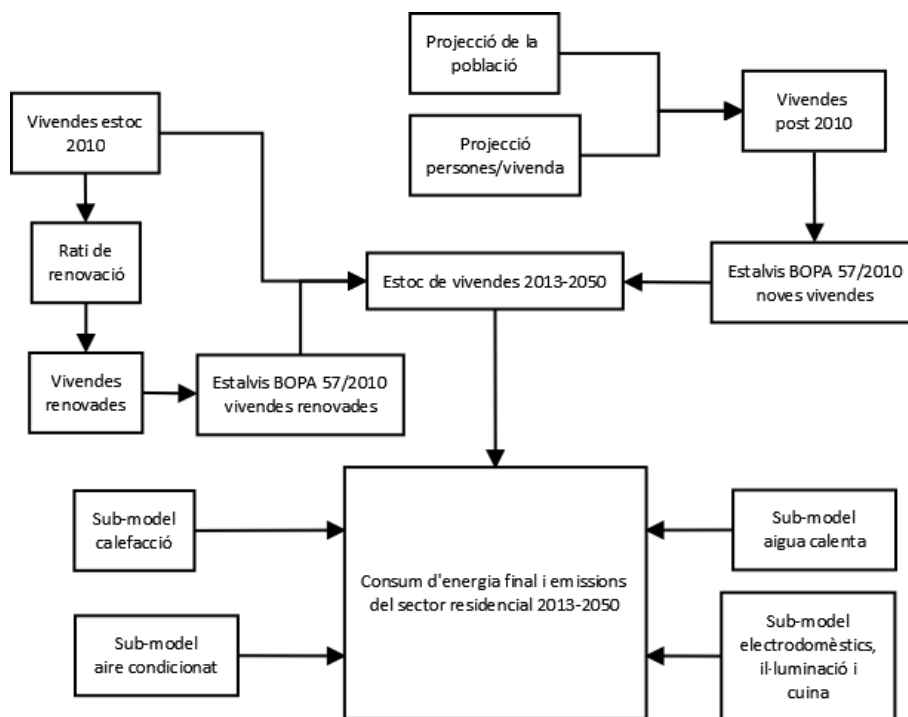


Fig. 2.7. Estructura general del model del sector residencial d'Andorra

Per tal de realitzar l'estimació del consum d'energia final del sector residencial s'han construït sub-models dels principals àmbits consumidors d'aquest sector. La segregació realitzada permet determinar el pes de cada un d'ells i posteriorment avaluar-ne el seu potencial d'estalvi. A continuació es detalla el procés desenvolupat per tal de caracteritzar cada un dels àmbits.

2.3.2 Calefacció

La calefacció és un dels paràmetres centrals del model ja que les condicions climatològiques d'Andorra (altitud mínima 838 m) impliquen una elevada despesa energètica en aquest àmbit.

Per tal de realitzar una estimació acurada del consum energètic en calefacció cal disposar de les condicions meteorològiques del territori, les característiques constructives dels habitatges existents i la seva distribució en el territori. Degut a l'absència de reglamentació

en matèria energètica no es disposa de dades detallades referents a les característiques de les construccions prèvies al reglament energètic en l'edificació. Per aquest motiu, és necessari seguir una metodologia alternativa per tal de realitzar aquesta estimació.

2.3.2.1 Estoc d'habitatges 2010

Tal com s'ha comentat prèviament, tot i l'absència de normativa pròpia d'Andorra fins l'any 2010, era pràctica habitual basar-se en les normatives dels països veïns. Partint d'aquesta hipòtesi s'assumeix una metodologia de càlcul desenvolupada tenint en consideració les característiques constructives dels habitatges espanyols. La metodologia emprada es basa en el *Documento de condiciones de aceptación de Programas Informáticos Alternativos* (Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2007). La demanda d'energia per calefacció s'estima tenint en consideració la severitat climàtica d'hivern (SCH) de la zona en estudi i la superfície construïda de cada tipus d'habitatge (unifamiliar o plurifamiliar). La SCH d'Andorra s'ha calculat seguint les pautes del *Código Técnico de la Edificación* (Gobierno de España, 2009). Aquesta es calcula mitjançant els graus dia (GD) d'hivern en base 20 dels mesos de gener, febrer i desembre i la mitjana de radiació global acumulada pels mateixos mesos. Els graus dia i la radiació de referència s'han calculat mitjançant les dades de temperatura recollides en l'estació de Roc de Sant Pere (Andorra la Vella) pel període 1992-2010 i la irradiància mitja diària mesurada en l'estació de l'Aparcament del Prat Gran (Escaldes-Engordany) pels anys 2007 a 2010. Els resultats obtinguts es mostren en la Taula 2.3.

GD= 461	Mitja dels graus dia d'hivern en base 20 pels mesos de gener, febrer i desembre
Rad= 45,88	Mitja de radiació global acumulada pels mesos de gener, febrer i desembre (kWh/m ²)
SCH= 1,34	Severitat climàtica d'hivern

Taula 2.3. Graus dia, radiació i severitat climàtica pel càlcul de la demanda tèrmica en calefacció

Com a últim pas del procés, s'obté la demanda de calefacció de referència per habitatge unifamiliar i plurifamiliar mitjançant els coeficients de la Taula 2.4 i l'equació següent:

$$\text{Demanda de calefacció de referència} = a + b \cdot SCH \quad \text{kWh/m}^2 \quad (2.1)$$

a i b Coeficients en funció del tipus d'habitatge
 SCH Severitat climàtica d'hivern

	a	b
Habitatges unifamiliars	9,29	54,98
Habitatges plurifamiliars	3,51	39,57

Taula 2.4. Coeficients pel càlcul de demanda de calefacció de referència. Font: Ministerio de Industria Turismo y Comercio (2007)

Aplicant la correlació descrita anteriorment s'obté una demanda energètica anual de 83 i 56 kWh/m² per habitatges unifamiliars i plurifamiliars respectivament. Finalment, considerant el rendiment de les màquines tèrmiques (Taula 2.5), les demandes de calefacció de referència i l'estimació del nombre i superfície de cada tipologia d'habitatge, s'obté la necessitat energètica en calefacció del Principat.

Les fonts energètiques actualment utilitzades en calefacció són l'electricitat, el fuel domèstic i el gas. Segons l'EPF de 2009, dada més actual en aquest àmbit, la font predominant és el fuel domèstic tot i que amb una tendència a l'alça de l'electricitat d'un 0,85% anual. Mantenint aquesta tendència obtenim els pesos de cada font per l'any base del model (Fig. 2.8).

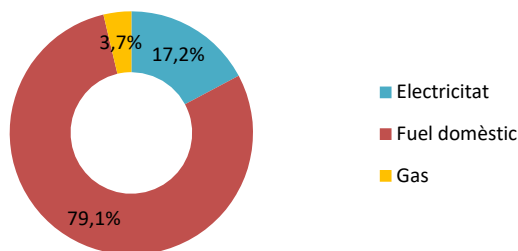


Fig. 2.8. Distribució de fonts d'energia emprades en calefacció l'any 2015

	Estoc 2010	Post 2010	Renovats
Elèctric	100%	100%	100%
Gasoil/gas	85%	95%	95%

Taula 2.5. Rendiments estacionals considerats en els habitatges previs i posteriors al reglament energètic de 2010

2.3.2.2 Habitatges post 2010 i habitatges renovats

El reglament energètic en l'edificació vigent des de l'any 2010 estableix valors límit i valors objectiu, aquests primers d'obligatori compliment per als edificis nous. Els valors límit i objectiu poden fer referència a coeficients de transmissió tèrmica (U) d'elements puntuals (p.ex. coberta, murs, forjats, finestres, etc.) o a prestacions globals de demanda energètica per superfície. Val a dir que les prestacions puntuals requerides estan fixades de

manera que, si s'assoleixen, la demanda resultant serà molt propera a l'establerta en la prestació global.

En el model, s'assumeix que els habitatges construïts amb posterioritat a l'entrada en vigor del reglament així com els que es construiran en un futur compliran la prestació global límit. Segons estableix el reglament, els valors límit per als edificis nous $Q_{h,li}$ es calculen tenint en compte el tipus d'edifici i factor d'envolupant A_{th}/A_E mitjançant la fórmula següent i la Taula 2.6.

$$Q_{h,li} = Q_{h,li0} + \Delta Q_{h,li} \cdot (A_{th}/A_E) \quad (2.2)$$

On:

A_{th} superfície de l'envolupant tèrmica de l'edifici

A_E superfície de referència energètica

Categoria d'obres	Valor límit	
	$Q_{h,li0}$ (kWh/m ²)	$\Delta Q_{h,li}$ (kWh/m ²)
Edifici plurifamiliar	15	18
Edifici unifamiliar	18	18

Taula 2.6. Valors límit de les necessitats de calor anuals per a la calefacció d'edificis nous per una temperatura exterior anual mitjana de 8,5°C. Font: Govern d'Andorra (2010)

Els grans edificis compactes tenen, per un mateix grau d'aïllament tèrmic, necessitats de calor per a la calefacció més baixes que les construccions petites poc compactes. Per tal de tenir en compte aquest fet, les prestacions globals requerides s'han definit en funció del factor d'envolupant (A_{th}/A_E). En els grans edificis compactes, els valors del factor d'envolupant estan compresos entre 0,4 i 0,8 mentre que en els edificis petits i poc compactes són propers a 2 (Govern d'Andorra, 2010). Per simplicitat, i de forma anàloga al reglament de la certificació energètica en l'edificació (Govern d'Andorra, 2012b), s'assumeix un únic valor de factor d'envolupant per a cada categoria d'edifici: 1,3 i 2 en cas d'habitatge plurifamiliar i unifamiliar respectivament.

Els valors límits obtinguts amb els valors de la Taula 2.6 i els assumits de factor d'envolupant són vàlids per a una temperatura mitjana anual de 8,5°C. Segons el reglament, aquests valors s'han de majorar o reduir un 8% quan la temperatura mitjana anual és més baixa o més alta, respectivament d'un Kelvin. La temperatura mitjana de la sèrie històrica amb la que es treballa en el model (estació Roc de Sant Pere pel període 1981-2014) és de 9,9°C pel que s'aplica una correcció del -11,2% als valors derivats de l'Eq. 2.2.

En el cas dels habitatges renovats, tal com estableix el reglament, el valor límit considerat s'eleva a un 125% del valor límit per als edificis nous. La Fig. 2.9 mostra la demanda energètica en calefacció de les diferents categories d'habitatges considerades en el model.

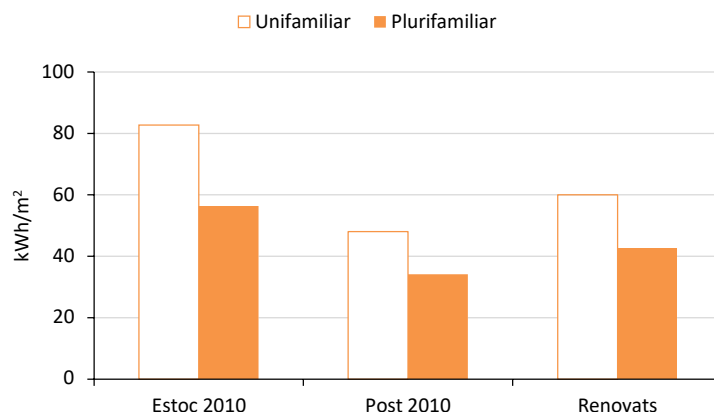


Fig. 2.9. Demanda d'energia final en calefacció per habitatge (kWh/m²·any)

Seguint l'establert pel reglament, les calderes dels habitatges post 2010 i renovats seran de baixa temperatura, de condensació o d'alt rendiment, millorant l'eficiència de les existents en el parc actual. La Taula 2.5 mostra els rendiments estacionals de les calderes dels habitatges construïts abans i després del reglament energètic així com dels renovats. Els valors assumits consideren que els habitatges de l'estoc de 2010 disposen majoritàriament de calderes convencionals.

2.3.3 Aigua Calenta Sanitària

Les necessitats d'energia per a l'ACS (Aigua calenta sanitària) es calculen mitjançant la metodologia detallada en el Reglament energètic en l'edificació (Govern d'Andorra, 2010). Aquesta, parteix del volum d'aigua consumit i el salt tèrmic entre la font d'aigua de la xarxa de subministrament i la temperatura d'ús.

$$Q_{ww} = \rho_w \cdot c_w \cdot V_{ww} \cdot (\theta_{ww} - \theta_{ww0}) \quad (2.3)$$

On:

- Q_{ww} necessitat de calor per a l'ACS (kWh)
- $\rho_w \cdot c_w$ capacitat tèrmica volumètrica de l'aigua (1,16 kWh/m³·K)
- V_{ww} quantitat d'aigua requerida durant el període de càlcul (m³)
- θ_{ww} temperatura d'ús de l'ACS (60°C)

θ_{ww0} temperatura de l'aigua de la xarxa de subministrament (°C)

La quantitat d'aigua calenta requerida per habitatge es calcula per una periodicitat mensual i assumint una demanda diferent, segons es tracti de llars unifamiliars (30 litres/persona i dia) o plurifamiliar (22 litres/persona i dia). Els valors de temperatura de l'aigua de la xarxa, detallats en la Taula 2.7, han estat facilitats pel Laboratori de Control del Comú d'Andorra la Vella.

G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2	3	4	5	6	7	8	9	7	5	3	2

Taula 2.7. Temperatura mitjana de l'aigua (°C) de la xarxa de subministrament pels 12 mesos de l'any. Font: Laboratori de Control del Comú d'Andorra la Vella (2012)

Amb les dades detallades es calcula la demanda energètica mensual d'ACS obtenint un total anual de 697 kWh/persona i 511 kWh/persona per habitatges unifamiliars i plurifamiliars respectivament. Finalment, considerant el rendiment de les màquines tèrmiques (veure Taula 2.5), s'obté el consum energètic d'ACS per cada tipologia d'habitatge.

De manera similar que en el cas de la calefacció, l'energia necessària per a l'ACS prové en els habitatges existents del fuel domèstic, l'electricitat i en menor mesura del gas. En aquest cas però, la tendència històrica publicada en l'EPF 2005-2009 mostra una davallada de l'electricitat a un ritme d'un 2,1% anual. La Fig. 2.10 mostra la distribució de fonts energètiques en l'any base del model considerant que es manté la tendència a la baixa de l'electricitat dels últims anys.

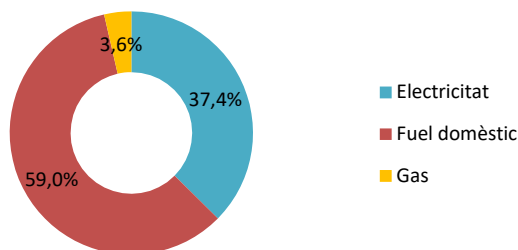


Fig. 2.10. Distribució de fonts d'energia emprades en ACS l'any 2015

2.3.4 Aire condicionat

Degut a les condicions climatològiques d'Andorra, l'ús d'aire condicionat en l'àmbit residencial és molt limitat. De totes maneres s'inclou en el model per tal de quantificar el

seu pes i així poder preveure'n la seva evolució sota escenaris de canvi climàtic o canvis en les costums dels ciutadans (temperatura de confort).

La metodologia utilitzada és equivalent a la detallada per calefacció però en aquest cas es treballa amb la severitat climàtica d'estiu (SCE) calculada a partir de la mitja dels graus dia d'estiu en base 20 pels mesos de juny, juliol, agost i setembre i la mitja de radiació global acumulada pels mateixos mesos. Els resultats obtinguts es mostren en la Taula 2.8. Les estacions meteorològiques i els períodes de mesura utilitzats corresponen als emprats en el càlcul de la demanda en calefacció.

GD= 23	Mitja dels graus dia d'hivern en base 20 pels mesos de juny, juliol, agost i setembre
Rad= 173,31	Mitja de radiació global acumulada pels mesos de juny, juliol, agost i setembre (kWh/m ²)
SCE= 0,28	Severitat climàtica d'estiu

Taula 2.8. Graus dia d'estiu, radiació i severitat climàtica d'estiu pel càlcul de la demanda en aire condicionat

A continuació, aplicant l'Eq. 2.4 amb els coeficients de la Taula 2.9, s'obté una demanda energètica anual en aire condicionat de 1,55 i 0,65 kWh/m² per habitatges unifamiliars i plurifamiliars respectivament.

$$\text{Demanda d'aire condicionat de referència} = a + b \cdot \text{SCE} \quad \text{kWh/m}^2 \quad (2.4)$$

a i b Coeficients en funció del tipus d'habitatge

SCE Severitat climàtica d'estiu

	a	b
Habitatges unifamiliars	-4,24	20,41
Habitatges plurifamiliars	-3,44	14,44

Taula 2.9. Coeficients pel càlcul de demanda d'aire condicionat. Font: Ministerio de Industria Turismo y Comercio (2007)

Cal assenyalar que, segons l'EPF de 2009, únicament l'1% dels habitatges disposen d'aire condicionat i en tots els casos la font energètica emprada és l'electricitat. Tenint en compte aquests factors, juntament amb el nombre d'habitatges existents, les seves superfícies i una eficiència energètica mitjana dels aparells (EER=3)¹³ (IEA, 2011), s'obté la necessitat energètica en aire condicionat del país.

¹³ Basat en *Energy Efficiency Ratio* dels aparells venuts a la Unió Europea pel període 2002-2009

2.3.5 Il·luminació

Per caracteritzar l'àmbit de la il·luminació s'utilitzen les dades resultants de l'anàlisi del consum energètic del sector residencial a Espanya (IDAE, 2011). Concretament, per establir el consum energètic de l'estoc d'habitatges del 2010 s'assumeixen els valors anuals referents a la zona continental, per ser la més equiparable a Andorra pel que fa a climatologia. Els valors observats a Espanya han estat corregits tenint en consideració la diferència de la superfície mitjana dels habitatges tant unifamiliars com plurifamiliars en ambdós països (p.ex. la superfície mitjana dels habitatges unifamiliars és molt superior a Andorra que a Espanya). A diferència de l'àmbit de la calefacció, en aquest cas s'ha considerat la superfície dels habitatges unifamiliars incloent jardins i balcons (325,61m²).

Basant-nos en l'equipament existent a Espanya, s'ha establert la penetració de les diferents tecnologies d'il·luminació de l'estoc d'habitatges de l'any 2010:

- convencional (representant les bombetes d'incandescència i les halògenes)
- baix consum (fluorescents i fluorescents compactes)
- LED (*light-emitting diode*)

Val a dir que l'any 2010, la tecnologia LED tenia un pes insignificant en el global d'habitatges (IDAE, 2011), pel que s'ha considerat inexistent en l'any base del model en els habitatges de l'*Estoc 2010*.

A diferència dels habitatges construïts amb anterioritat al reglament energètic, s'ha considerat que els *habitatges post 2010* incorporen en la seva totalitat la tecnologia LED, contribuint de forma destacada a una reducció del consum en l'àmbit de la il·luminació. La Taula 2.10 mostra el consum energètic anual en il·luminació segons tipus d'habitatges així com la penetració de cada tecnologia.

	Unifamiliar		Plurifamiliar	
	Estoc 2010	Habitatges post 2010	Estoc 2010	Habitatges post 2010
Consum energètic (kWh/any)	900,94	116,98	273,73	35,54
Penetració baix consum (%)	41,76	0	41,76	0
Penetració LED (%)	0	100	0	100

Taula 2.10. Consum energètic anual en il·luminació i penetració de lluminàries de baix consum i LED l'any 2015

L'eficiència considerada per cada tipus de lluminària s'obté de l'estudi comparatiu realitzat per Rubinger et al. (2015), on demostra que les bombetes de baix consum i els LEDs són 4,5 i 10 vegades respectivament més eficaçes (lm/W) que les incandescents.

2.3.6 Cuina

En l'àmbit de la cuina, el consum energètic anual s'ha equiparat a l'observat als habitatges francesos (Enerdata, 2015)¹⁴. La font energètica utilitzada majoritàriament als habitatges andorrans és l'electricitat. Segons l'EPF 2005-2009, aproximadament un terç dels habitatges utilitzaven gas l'any 2009 però s'apreciava una important penetració elèctrica en detriment d'aquest (5,2%/any), motiu pel qual s'estima que l'any base del model únicament al voltant del 3% dels habitatges cuinen amb gas (veure Fig. 2.11).

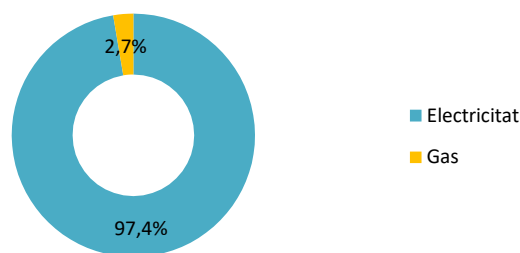


Fig. 2.11. Distribució de fonts d'energia emprades en cuina l'any 2015

2.3.7 Electrodomèstics

Per tal de caracteritzar el consum energètic dels electrodomèstics és important tractar aquests en dos grups diferenciats. Es parlarà de grans electrodomèstics en referència al frigorífic, congelador, rentadora, rentavaixelles, assecadora i televisió. D'altra banda, s'entén com a petits electrodomèstics, aparells de cuina o neteja com la cafetera, batedora o l'aspiradora així com també aplicacions relacionades amb les TIC (Tecnologies de la Informació i Comunicació). És convenient realitzar aquesta segregació dins aquest àmbit degut a que les dinàmiques d'ambdós grups tant en presència als habitatges com en consum han estat molt diferents en els últims anys. A nivell europeu, mentre bona part dels grans electrodomèstics han assolit nivells de saturació amb ratis de penetració propers al 100% (p.ex. rentadora, frigorífic o televisió), els petits electrodomèstics han representat el major increment en ús final d'electricitat en el sector residencial (Bertoldi et al., 2012).

La Taula 2.11 mostra el consum d'energia final anual dels diferents electrodomèstics considerats, assumint les dades existents per França (Enerdata, 2015), juntament amb el rati de penetració en els habitatges andorrans derivat de l'EPF 2010-2012.

¹⁴ El projecte ODYSSEE-MURE realitza un monitoratge de la tendència de l'eficiència energètica i les mesures aplicades en relació a aquesta a la UE i Noruega

Electrodomèstics		Consum específic anual (kWh/aparell)	Rati de penetració en l'any base (%)
Grans electrodomèstics	Frigorífic	350	100
	Congelador	384	31
	Rentadora	277	98
	Rentavaixelles	195	56
	Assecadora	484	33
	Televisió	197	100
	Total any base	1207 kWh	
Petits electrodomèstics	Petits aparells de cuina, neteja i TIC	1611 kWh	

Taula 2.11. Consum d'energia final anual dels electrodomèstics i rati de penetració l'any 2015. Font: Base de dades ODYSSE (França) i EPF 2010-2012

2.4 Sector del transport

La modelització del sector del transport mitjançant LEAP s'ha realitzat a través d'una metodologia *bottom-up* i amb un alt nivell de desagregació considerant els diferents subsectors representatius del país. La naturalesa *bottom-up* del model permet avaluar l'impacte de polítiques energètiques en el consum d'energia d'aquest sector a més de traçar escenaris de futur en base a diferents hipòtesis. L'aprofundiment al qual s'ha pogut arribar en la modelització d'aquest sector ha estat fruit essencialment de l'accés a dades prou representatives del parc automobilístic actual, permetent caracteritzar amb molt detall el sector amb el major impacte en consum d'energia i emissions de CO₂ del país (Miquel et al., 2014).

D'acord a les dades nacionals de vehicles registrats a finals de l'any 2015 i a les inspeccions tècniques de vehicles (Departament d'Indústria, 2016), s'han caracteritzat cinc subsectors (veure Fig. 2.12) representant la globalitat del sector del transport a Andorra: parc de turismes, transport de mercaderies, transport de passatgers, vehicles a dues rodes i *fuel tourism*.

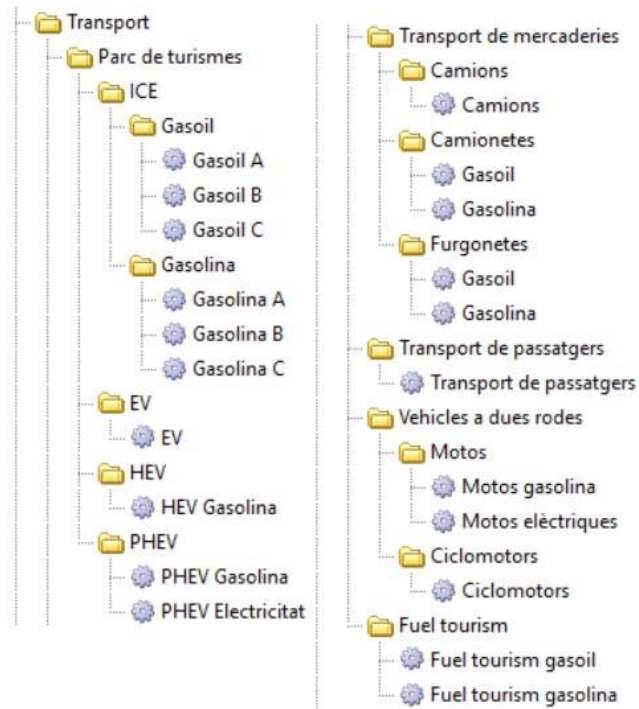


Fig. 2.12. Estructura d'arbre del model LEAP-Andorra representant el sector del transport

2.4.1 Parc de turismes

Externament a LEAP i mitjançant un full de càlcul, s'ha construït un model d'estoc que representa el parc de turismes d'Andorra de l'any 2015 i posteriorment, s'ha integrat al LEAP-Andorra. Travesset-Baro et al. (2016) presenten una descripció detallada de la implementació i validació del model, en aquest cas l'any base del model és el 2013. Aquest utilitza l'estructura del parc, el perfil d'activitat (km/any) i el consum energètic específic de cada vehicle (MJ/km) com a variables explicatives. El parc de turismes del 2015 s'ha desagregat en diferents categories (veure Fig. 2.13) en funció de la motorització (gasoil, gasolina, electricitat, híbrid o híbrid endollable), la cilindrada (<1400 cc, 1400-2000 cc, >2000 cc) i l'edat (0-30 anys), factors amb un fort impacte en el consum final d'energia del parc. A continuació, es defineix el perfil d'activitat de cada categoria de vehicles, basat en les inspeccions tècniques de vehicles. D'igual manera que en estudis similars realitzats en altres països (Daly and Ó Gallachóir, 2011a; Hickman et al., 1999), els vehicles de gasoil i els de cilindrades més grans tendeixen a recórrer majors distàncies. S'observa també una caiguda en els quilòmetres realitzats al llarg de la vida dels vehicles, de magnitud similar en els turismes de gasoil i gasolina. D'altra banda, per tots dos combustibles, la caiguda de quilometratges és major en vehicles de gran cilindrada que en les mitjanes i baixes (Travesset-Baro et al., 2016). L'absència de dades històriques en les tecnologies més noves

(vehicle elèctrics, híbrids i híbrids endollables) impossibilita obtenir un perfil d'activitat propi per cada una d'aquestes categories. En el model s'assigna a totes elles el perfil d'activitat de la categoria Gasoil >2000cc, per ser la que recorre majors distàncies anuals. Cada categoria té associat un consum d'energia específic (SEC), el qual té en consideració el test oficial de consum europeu. Finalment, es considera un *on-road factor* (per representar l'increment entre els consums reals i els proporcionats pel test europeu) i un factor d'envelliment (per tal d'incloure l'efecte de l'edat en el consum de combustible).

L'*on-road factor* d'Andorra ha estat estimat a través d'un estudi en el que es caracteritza una ruta real del país i s'hi simula el comportament energètic de diferents vehicles tant tèrmics com elèctrics. Els resultats quantifiquen el diferencial de consum energètic dels turismes entre el test de certificació europeu NEDC (*New European Driving Cycle*) i les condicions reals de circulació a Andorra en un 39,6% i un 27,6% per vehicles tèrmics i elèctrics respectivament (Travesset-Baro et al., 2015). En el model LEAP-Andorra s'apliquen aquests valors d'*on-road factor* a totes les categories de turismes.

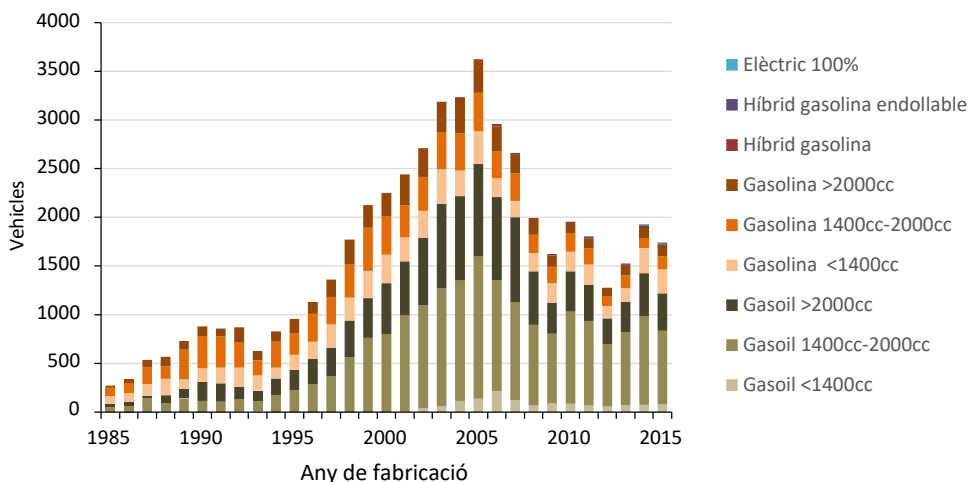


Fig. 2.13. Parc de turismes de l'any 2015 segregat segons motorització, cilindrada i edat

Combinant tots els factors detallats, el consum final d'energia del parc de vehicles es calcula segons l'Eq. 2.5.

$$FE = \sum_{f,cc,a} S_{f,cc,a} \cdot M_{f,cc,a} \cdot SEC_{f,cc,a} \cdot ORF \cdot A_a \tag{2.5}$$

On *FE* és el consum d'energia final del parc de turismes, *f* és el tipus de combustible, *cc* la cilindrada, *a* l'edat del vehicle, *S* l'estoc, *M* l'activitat, *SEC* el consum d'energia específic,

ORF l'on road factor i *A* el factor d'envelliment. D'aquesta manera, els principals factors influents en el consum energètic i les diferents tipologies de turismes existents poden ser analitzades de forma separada.

2.4.2 Altres consums interns

La resta de consums energètics associats a vehicles registrats a Andorra s'ha segregat en tres sub-sectors: transport de mercaderies (format per camions, furgonetes i camionetes), transport de passatgers i vehicles a dues rodes (format per motocicletes i ciclomotors). En conjunt, representen menys del 30% dels vehicles registrats l'any 2015 (Departament d'Indústria, 2016), dada que aporta una primera noció del consum energètic que poden representar a nivell de país. En aquest cas, les categories incloses en cada un dels sub-sectors s'han tractat de forma agregada a excepció de les furgonetes i camionetes que s'han dividit segons el combustible utilitzat (gasoil o gasolina) i els vehicles a dues rodes segregats en motos de gasolina o elèctriques. Val a dir que la resta de sub-sectors i categories utilitzen únicament un tipus de combustible. D'altra banda, s'ha considerat menyspreable el consum d'altres vehicles registrats al país però amb un pes insignificant respecte l'estoc total (p.ex. motos de neu, vehicles agrícoles i vehicles industrials).

Per tal d'estimar el consum energètic anual de cada sub-sector s'ha treballat amb les dades de vehicles registrats des de l'any 1951 i les ITV's (Inspeccions Tècniques de Vehicles) realitzades fins l'any 2015 (Departament d'Indústria, 2016). La mostra de cada sub-sector i categoria utilitzada en el model s'ha limitat als vehicles amb any de fabricació posterior a 1984, assumint que els automòbils anteriors a aquesta data són vehicles de museu, errors del registre o vehicles en desús. Aquesta hipòtesi s'ha validat a través de les ITV's, confirmant que aquest grup de vehicles no han passat les inspeccions corresponents, representen una part menyspreable de l'estoc o realitzen un nombre de quilòmetres anuals insignificants.

El consum energètic es calcula individualment per cada vehicle, dels quals cal conèixer l'activitat anual (km/any) i el consum energètic específic (L/100 km). El registre de vehicles no disposa d'aquesta informació, pel que ha estat necessari realitzar-ne una estimació. L'activitat (km/any) s'ha estimat per cada vehicle tenint en compte els quilòmetres realitzats entre les dues últimes ITV's de les quals es disposa de dades. Val a dir que únicament una part de l'estoc de cada sub-sector disposa d'informació en aquest sentit, pel que la dada de consum energètic total s'extrapola partint de la mostra de vehicles que disposen de dades. D'altra banda, s'ha considerat un consum energètic específic mig per a cada categoria de vehicles. Aquests s'han definit en alguns casos tenint en consideració les marques i models

dels vehicles majoritaris en l'estoc juntament amb les seves especificacions tècniques i en altres basant-se en bibliografia existent en aquest camp. La Taula 2.12 mostra les dades utilitzades per estimar el consum d'energia final de cada un dels sub-sectors considerats, així com els resultats obtinguts. A continuació es justifiquen els valors de consum energètic específic considerats en el present estudi.

El consum específic dels camions està directament relacionat amb el seu nivell de càrrega. Segons dades de Ubeda et al. (2011), un camió sense càrrega consumeix 29,6 L/100 km mentre que a càrrega completa aquest incrementa fins als 39 L/100 km. En el present estudi s'ha considerat un consum mig de 34 L/100 km. Val a dir que aquest valor també està en la línia dels publicats en la base de dades del projecte Odyssee-Mure (Enerdata, 2015), en la qual el consum específic dels camions d'Espanya i França és 32 i 35 L/100 km respectivament.

La categoria *camionetes* inclou principalment camions lleugers i en menor mesura *pick-ups*. Entre els models majoritaris presents en l'estoc hi trobem el Nissan Cabstar, el Mitsubishi Canter i el Toyota Dyna. El consum específic considerat (veure Taula 2.12) es basa en el consum mig dels camions lleugers publicats a l'última edició del *Transportation Energy Data Book* (Davis et al., 2014).

La categoria denominada *furgonetes* inclou els vehicles comercials petits, de caixa tancada amb porta a la part posterior per a efectuar la càrrega i la descàrrega i sense seients per a passatgers. Entre els vehicles majoritaris de gasoil en aquest segment hi destaquen la Renault Kangoo, la Citroën Berlingo i la Seat Inca. Les furgonetes de gasolina són molt minoritàries i en general amb antiguitats superiors als 15 anys. Tenint en consideració els consums energètics en cicle NEDC (VCA, 2016) s'assumeixen els valors mitjos dels models predominants en cada categoria. Als consums energètics específics mostrats en la Taula 2.12, se'ls aplica una correcció mitjançant l'*on-road factor* dels vehicles tèrmics en territori andorrà (Travesset-Baro et al., 2015) per tal de tenir en compte la diferència entre els consums aportats pel cicle de certificació NEDC i els donats en condicions reals de circulació.

El sub-sector *transport de passatgers* està format per autobusos urbans, interurbans i minibusos. A partir de les mesures de consum de combustible d'autobusos urbans i interurbans publicades en l'estudi de Outeda et al. (2009), tenint en consideració la diversitat de vehicles existents en aquesta categoria i la tipologia de trajectes a Andorra (majoritàriament urbans), s'ha establert un consum energètic específic mig per vehicle de 30 L/100 km.

El sub-sector *vehicles a dues rodes* integra motocicletes i ciclomotors. En la primera categoria hi predominen les motocicletes de 125 cc i en menor mesura de 150, 250 i 600 cc. S'inclou també la categoria de motos elèctriques tot i que el seu pes en l'estoc actual és

insignificant. El consum energètic específic mig de les motos de gasolina s'estableix tenint en consideració el consum de combustible¹⁵ d'un model representatiu de cada una de les cilindrades citades. El consum de la moto elèctrica Vectrix VX-1 es considerat com a representatiu d'aquesta categoria per ser el model predominant en l'estoc actual. Per la seva banda, la categoria *ciclomotors* engloba tots els vehicles de dues rodes amb cilindrada inferior a 125 cc. Val a dir però que predominen els ciclomotors de 49 cc (76% respecte el total). El consum de combustible mig d'aquesta categoria s'ha establert a partir del valor de consum del model majoritari dins aquesta cilindrada (Yamaha BWS 50¹⁶).

Sub-sector i categoria	Estoc	Mostra ITV ¹⁷	Activitat mitjana ¹⁸ (km/any)	Combustible utilitzat	Consum energètic específic (L/100 km)	Consum energètic total (L)
Transport de mercaderies						
<i>Camions</i>	745	321	25147	Gasoil	34	6369853
<i>Camionetes gasoil</i>	848	453	9823	Gasoil	12,3	1024539
<i>Camionetes gasolina</i>	22	18	6725	Gasolina	13,5	19973
<i>Furgonetes gasoil</i>	2964	1559	11259	Gasoil	6	2002338
<i>Furgonetes gasolina</i>	156	103	7206	Gasolina	7,5	84314
Transport de passatgers	208	108	39463	Gasoil	30	2462524
Vehicles a dues rodes						
<i>Motos gasolina</i>	10776	2.933	2215	Gasolina	3,5	835551
<i>Motos elèctriques</i>	8	0	2215	Electricitat	80*	177,2**
<i>Ciclomotors</i>	2640	0	2215 ¹⁹	Gasolina	2	116952

Taula 2.12. Detall de les dades utilitzades en l'estimació del consum energètic dels diferents sub-sectors (*unitats en Wh/km, **unitats en kWh/any)

2.4.3 Fuel tourism

El *fuel tourism* és un factor important dins el sector del transport a Andorra. El diferencial de preus existent en els carburants respecte els països veïns (el preu del gasoil i la gasolina és inferior a Andorra que a França i a Espanya degut a la política fiscal del país) n'és el

¹⁵ Consums mitjos de combustible de les motocicletes extrets de <http://www.motorcyclespecs.co.za/>

¹⁶ <http://www.yamaha-motor.ca/>

¹⁷ El camp *Mostra ITV* fa referència als vehicles de l'estoc de cada sub-sector dels quals es disposa de dades fiables referents a l'activitat anual (km/any)

¹⁸ El valor mostrat en aquest camp no s'utilitza en el càlcul, ja que es treballa amb la dada de quilometratge de cada un dels vehicles de la mostra però s'aporta en la taula per mostrar les diferències d'activitat entre sub-sectors

¹⁹ En aquest cas s'ha considerat l'activitat mitjana de les motocicletes ja que els ciclomotors estan exempts de l'obligatorietat de realitzar les inspeccions tècniques periòdiques

principal responsable, tant en el transport de passatgers com en el de mercaderies. L'alt nombre de visitants que rep Andorra i el fet que tots ells arribin per carretera incentiva també aquest fenomen.

L'alt rati entre visitants i població resident al país, juntament amb el diferencial de preus mantingut en els combustibles amb els països veïns fa pensar que el *fuel tourism* pot representar una part molt considerable de les importacions de combustibles de locomoció. Una primera aproximació realitzada en El Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra (Govern d'Andorra, 2012a) estima que el *fuel tourism* representa al voltant del 50% de l'energia consumida en el sector del transport.

En el present estudi, donada l'estimació realitzada del consum energètic de cada un dels sub-sectors que formen el sector del transport, s'estima el consum d'energia generat pel *fuel tourism* com la diferència entre les importacions i el consum intern de cada un dels combustibles de locomoció. La Fig. 2.14 mostra el combustible importat al país associat al *fuel tourism* així com la proporció que representa respecte les importacions totals. Segons l'estimació realitzada, el 51% de les importacions de gasoil i el 20% de les de gasolina estan destinades al *fuel tourism*. Tenint en consideració el volum d'importacions total de cada combustible es pot concloure que el *fuel tourism* representa aproximadament el 45% de l'energia relacionada amb el transport a Andorra, igualant el pes relatiu del parc nacional de turismes.

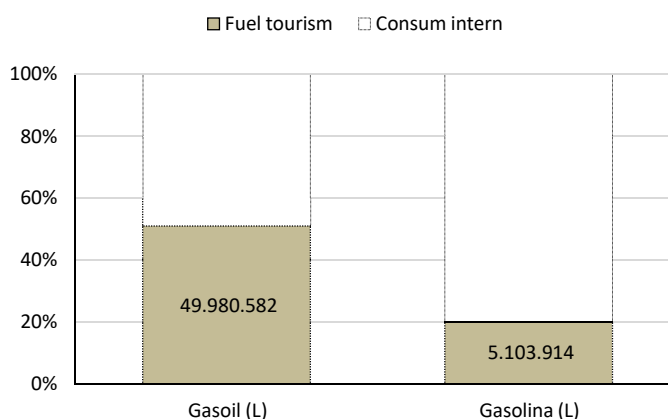


Fig. 2.14. Estimació del *fuel tourism* desagregat segons tipus de combustible

2.5 Administració pública

La modelització del consum energètic de l'administració pública s'ha realitzat considerant per separat els dos principals àmbits consumidors del sector: els edificis i l'enllumenat públic. Les dades disponibles en cada un dels àmbits ha condicionat la

metodologia utilitzada així com els resultats obtinguts. El projecte *Estimació de les accions a realitzar en eficiència energètica en l'àmbit dels edificis públics* realitzat per l'OBSA per encàrrec de FEDA i finalitzat el mes de Setembre de 2014 ha servit de base per a la caracterització dels edificis públics (OBSA, 2014). En el model LEAP-Andorra, s'han tractat de forma diferenciada els equipaments públics existents en l'actualitat dels que es construiran a futur, considerant que aquests últims tindran una millor eficiència energètica.

D'altra banda, l'enllumenat públic s'ha modelitzat a partir de les sèries històriques dels consums finals d'energia elèctrica segons sectors d'activitat (Departament d'Estadística, 2016b). La Fig. 2.15 mostra els àmbits considerats en el model LEAP-Andorra associats a l'administració pública.

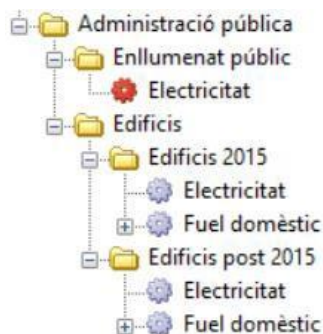


Fig. 2.15. Estructura d'arbre del model LEAP-Andorra representant l'administració pública

A continuació es detalla la metodologia desenvolupada en la modelització d'aquest sector.

2.5.1 Edificis públics

La metodologia desenvolupada per a realitzar la modelització del consum d'energia en els edificis públics consta de cinc punts principals:

- 1) Identificació i localització dels edificis públics d'Andorra.
- 2) Construcció de la base de dades de partida.
- 3) Anàlisi de les auditories energètiques existents realitzades en equipaments públics.
- 4) Selecció d'edificis de referència i extrapolació dels consums d'energia final a la totalitat del parc d'edificis públics del país.
- 5) Recopilació de les mesures d'eficiència energètica proposades en les auditories, quantificació del seu estalvi i extrapolació del seu impacte a escala de país.

La identificació dels edificis públics s'ha realitzat mitjançant la utilització d'un sistema d'informació geogràfica (SIG). La capa d'informació de partida ha estat facilitada pel Departament de Cartografia del Govern d'Andorra. Aquesta ha estat sotmesa a una

actualització i neteja de la informació disponible per tal de corregir deficiències com la manca d'alguns edificis, la multiplicació de polígons idèntics o l'existència d'edificis erronis. Les correccions s'han basat en observacions realitzades durant el treball de camp que ha servit també per identificar el nombre de plantes i tipologia d'ús dels edificis. S'ha considerat com a edifici públic aquell que independentment de la seva titularitat desenvolupa una activitat gestionada des del sector públic. En aquest sentit, és important destacar que no s'han segregat els edificis en funció del seu règim de propietat o lloguer. De la mateixa manera, també s'han considerat com a edificis públics aquells gestionats per empreses parapúbliques o dependents d'institucions públiques. Degut a la seva rellevància i l'important nivell de coordinació que presenten, també s'han tingut en consideració les escoles que formen part dels sistemes educatius espanyol i francès. La Fig. 2.16 mostra una part de la capa d'edificis públics desenvolupada.



Fig. 2.16. Vista de la capa SIG dels edificis públics d'Andorra (en color taronja)

A continuació s'ha desenvolupat una base de dades inicial que inclou la totalitat d'edificis estudiats, la seva superfície de coberta, el perímetre, el número de plantes i el seu ús. Així doncs, en la caracterització de l'administració pública s'han considerat:

- 124 edificis
- totalitzant 537164 m² de superfície construïda i
- 136175 m² de coberta (9% de les cobertes del país)

Un cop identificats els edificis, s'ha procedit a caracteritzar-ne el seu consum energètic. Davant la impossibilitat de disposar de dades reals de consum d'electricitat i fuel domèstic de cada uns d'ells, s'ha optat per realitzar una estimació a partir d'edificis similars coneguts. Entre els anys 2012 i 2014, FEDA va dur a terme quinze auditories energètiques en edificis públics del país, els resultats de les quals han servit de base per a la present estimació. Entre els edificis estudiats en les auditories, se n'han seleccionat vuit, englobant diferents tipologies representatives del total d'edificis públics. La Fig. 2.17 mostra el consum d'energia final per unitat de superfície dels edificis escollits com a referència. A cada un dels 124 edificis inclosos en la base de dades se'ls assigna un dels vuit edificis de referència en base a la seva tipologia d'ús. Tot seguit, l'estimació del consum d'energia final d'electricitat i fuel domèstic es calcula mitjançant les dades de consum de l'edifici de referència assignat i la superfície de cada un dels edificis identificats.

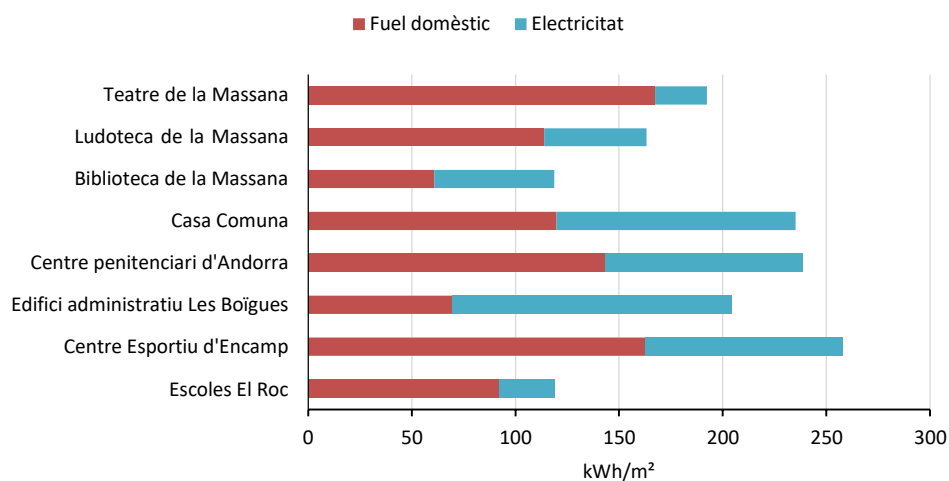


Fig. 2.17. Consum d'energia final anual dels edificis de referència per unitat de superfície (kWh/m²)

Seguint aquesta metodologia el consum final d'electricitat del parc d'edificis públics és de 32,3 GWh, prop d'un 6% del consum d'energia elèctrica nacional. Comparant aquest resultat amb la dada oficial de consum d'electricitat de les administracions de l'any 2015 (Departament d'Estadística, 2016b), s'observa que l'estimació realitzada és un 11,8% inferior a la dada oficial (veure Fig. 2.18). Aquesta desviació pot ser deguda a que en la dada oficial s'hi suma la part proporcional del consum de les altres distribuïdores considerant que la proporció de consum de l'administració pública és igual a les parròquies on opera FEDA que a la resta. En el cas d'altres sectors aquesta pot ser una bona aproximació. En l'administració pública, tenint en compte que FEDA opera a la capital, on la concentració

d'edificis públics per habitant és més elevada, és d'esperar que el consum d'electricitat d'aquest sector tingui major pes que en les altres parròquies.

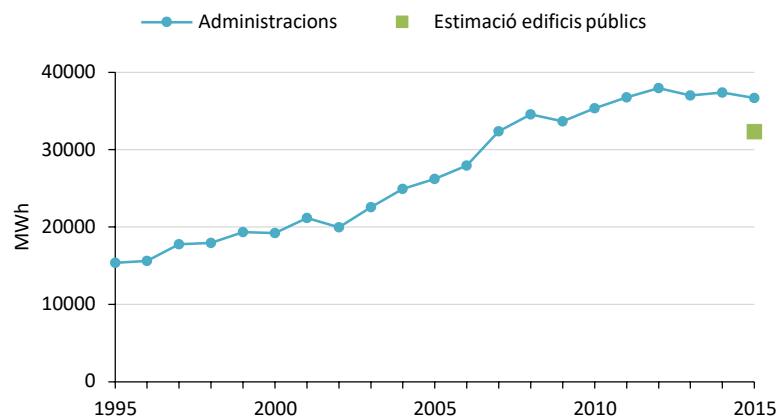


Fig. 2.18. Consum d'energia elèctrica final de l'administració pública (1995-2015) i estimació realitzada en el model

D'altra banda, s'han recopilat les mesures d'eficiència energètica proposades en les auditories realitzades en els edificis de referència. Aquestes s'han classificat segons el seu àmbit d'aplicació (mesures constructives, calefacció, refrigeració, il·luminació i ventilació) i s'ha estimat l'estalvi d'energia aportat per cada una de les actuacions proposades. Per quantificar la contribució de les diferents mesures a cada un dels edificis, s'han extrapolat els resultats de les mesures d'eficiència energètica dels edificis de referència a la totalitat del parc públic. Seguidament es detallen les mesures considerades i el procés realitzat en l'extrapolació de l'estalvi energètic aportat per cada una d'elles. Val a dir que les mesures proposades en les auditories són diferents per a cada edifici de referència. El resum mostrat a continuació exposa de forma general les principals actuacions plantejades.

Mesures constructives

Com a mesures constructives es planteja principalment:

- La millora de l'aïllament de les façanes i cobertes
- El canvi de finestres
- La independització de zones calefactades

S'ha considerat que l'efecte d'aquestes mesures serà sobre el consum de fuel domèstic de l'edifici. A fi d'extrapolar les dades dels edificis de referència a la resta d'edificis s'aplica una correcció tenint en compte la superfície de l'envolupant dels edificis estimada a partir de la superfície de la coberta i el nombre de plantes.

Calefacció

Segons les auditories energètiques, les mesures que s'han identificat són principalment:

- La substitució de les calderes existents per models més eficients (p.ex. tecnologia de baixa temperatura o biomassa)
- L'aïllament del sistema de calefacció
- La instal·lació d'aerotèrnia
- El control de temperatura

Per tal d'extrapolar els estalvis obtinguts en els edificis de referència s'ha realitzat una correcció mitjançant la superfície construïda dels edificis calculada a partir de la superfície de coberta i el nombre de plantes. L'impacte d'aquestes mesures s'ha considerat sobre el consum de fuel domèstic.

Refrigeració

Com a mesures de refrigeració s'han identificat principalment la instal·lació de sistemes de *free-cooling*²⁰ i de bombes de calor. A fi d'extrapolar les dades dels edificis de referència s'ha realitzat una correcció a través de la superfície construïda dels edificis. L'afectació d'aquestes mesures es considera sobre el consum d'electricitat.

Il·luminació

Les principals mesures identificades en l'àmbit de la il·luminació recauen en canvis en la tecnologia passant de fluorescència convencional a tecnologies de baix consum com els LEDs, la regulació de la intensitat de les llums o la instal·lació de detectors de presència. L'extrapolació de les dades dels edificis de referència s'ha realitzat a través de la dada de superfície construïda dels diferents edificis identificats. El benefici d'aquestes mesures s'aplica sobre el consum d'electricitat.

Ventilació

En les auditories energètiques, com a mesures de ventilació hi predominen la instal·lació de recuperadors entàlpics. L'extrapolació de les dades dels edificis de referència s'ha realitzat a través de la dada de superfície construïda dels diferents edificis identificats. El benefici d'aquestes mesures s'aplica sobre el consum d'electricitat.

La Taula 2.13 mostra, a tall d'exemple, les mesures considerades i els estalvis d'energia estimats en un dels edificis de referència (OBSA, 2014).

²⁰ Sistema que es basa en l'aire exterior per refrigerar un espai

Tipus de mesura	Mesura	Inversió (€)	Estalvi energètic (kWh)	Total d'estalvi (kWh)
Constructiu	Canvi de finestres	55269	104217	191885
	Aïllament façana nord (295m ²)	20597	46935	
	Aïllament garita	5395	11557	
	Aïllament despatx manteniment	5000	11900	
	Finestres soterrani i tancament galeries	1841	6566	
	Tancaments portes metàl·liques	1500	10711	
Calefacció	Aerotèrmia (emissors de baixa temperatura i ACS)	85470	221651	391868
	Substitució caldera per baixa temperatura	9410	100789	
	Aïllament xarxa de distribució	7500	26777	
	Variadors de freqüència (bombes d'aigua)	6859	36728	
	Cortina d'aire entrada	2766	5923	
Il·luminació	Doblatge del circuit d'il·luminació exterior	7616	89600	163965
	Fluorescència de baix consum	6395	44247	
	Substitució il·luminació de 250 W	320	30118	
Refrigeració	<i>Free cooling</i>	26000	50976	60141
	Variadors de freqüència (bombes d'aigua)	1559	9165	
Ventilació	Instal·lació recuperadors entàlpics	9829	57812	78553
	Instal·lació sondes de CO ₂	2998	20741	

Taula 2.13. Mesures d'eficiència i estalvis d'energia considerats en el Centre Penitenciari d'Andorra

Tal com s'ha comentat anteriorment, en el model LEAP-Andorra es tracten de forma diferenciada els edificis públics existents dels previstos de construir en els propers anys. S'ha considerat que els edificis públics de nova construcció disposaran de millor eficiència energètica que els existents. Concretament s'estableix que els nous edificis estaran dotats de les millores definides en les auditories i per tant, com es pot observar en la Fig. 2.19, els seus consums d'energia seran considerablement inferiors als dels equipaments actuals (167 kWh/m² i 96 kWh/m² pels edificis actuals i nous respectivament).

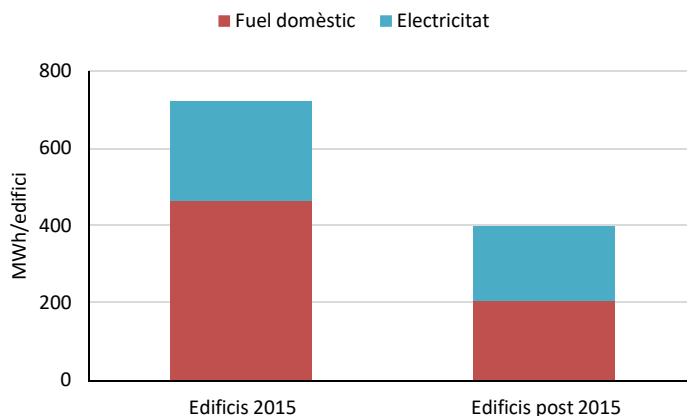


Fig. 2.19. Comparativa del consum d'energia final anual dels edificis públics existents i els de nova construcció

2.5.2 Enllumenat públic

L'enllumenat públic representa un 2% del consum d'energia elèctrica anual del país. Tal com s'aprecia en la Fig. 2.20, l'evolució històrica d'aquest consum ve marcada per un augment continuat fins l'any 2009, moment en el que es produeix una estabilització seguida d'un nou creixement de l'any 2011 al 2013.

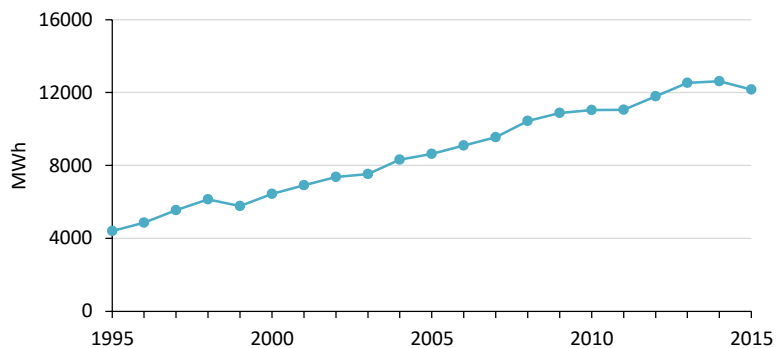


Fig. 2.20. Consum d'energia elèctrica final de l'enllumenat públic (1995-2015)

La caracterització del consum elèctric de l'enllumenat públic parteix de les dades anuals d'ús d'electricitat segregades segons activitats econòmiques (Departament d'Estadística, 2016b). En l'any base del model, el consum d'energia elèctrica final relatiu a l'enllumenat públic és de 12,17 GWh, aproximadament un 0,5% del consum d'energia final del país.

2.6 Sectors secundari i terciari

En el present model es caracteritzen els consums associats al sector secundari i terciari de forma separada i desagregada per activitats en els casos que les dades existents ho permeten. Les diferents activitats dins de cada sector s'han establert d'acord a la classificació utilitzada pel Departament d'Estadística en la publicació dels consums finals d'energia elèctrica (Departament d'Estadística, 2016b). El sector secundari està format per la indústria, amb una presència molt minsa dins l'economia andorrana, i la construcció, sector en clar retrocés en els últims anys. Per la seva banda, el sector terciari té en consideració la distribució (inclou grans magatzems, botigues i magatzems), l'hoteleria i la restauració, els serveis financers, les estacions d'esquí i la categoria d'altres serveis (formada per estacions, serveis, transports, garatges, professions liberals, correus i telègrafs, centres d'ensenyament i activitats diverses).

Els consums energètics donats en els principals sectors d'activitat del país tenen per una banda un origen fòssil, principalment fuel domèstic relacionat amb calefacció, i per l'altra elèctric. La Fig. 2.21 mostra les activitats considerades en el model LEAP-Andorra associades a cada sector i diferenciades segons la font energètica utilitzada.

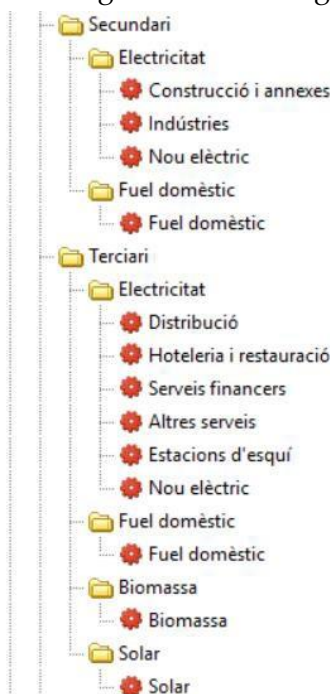


Fig. 2.21. Estructura d'arbre del model LEAP-Andorra representant els sectors secundari i terciari

Tal com es pot observar, el fuel domèstic, a diferència de l'electricitat, s'ha tractat de forma agregada degut a l'absència d'informació pública disponible més específica en aquest

camp. A continuació es detalla el procés seguit en la caracterització dels diferents sectors. Degut a la diferència entre dades disponibles segons fonts energètiques, s'han seguit metodologies diferents pels consums d'electricitat i fuel domèstic.

2.6.1 Electricitat

La modelització dels consums elèctrics del sector secundari i terciari parteix de les dades anuals d'ús d'electricitat segregades segons activitats econòmiques (Departament d'Estadística, 2016b). Val a dir que el nivell de segregació detallat en la secció anterior, únicament està disponible per a les parròquies en que opera FEDA, és a dir, Canillo, Encamp (exceptuant el Pas de la Casa), Andorra la Vella i Escaldes-Engordany. En la resta de parròquies que depenen d'altres distribuïdores es disposa de la dada de consum elèctric agregat.

En la Fig. 2.22 es mostra el consum elèctric mensual de FEDA i de les altres distribuïdores l'any 2015. Com es pot observar, l'estacionalitat d'ambdues sèries és força similar. Aquest fet indica que molt probablement el pes de les diferents activitats econòmiques serà també semblant.

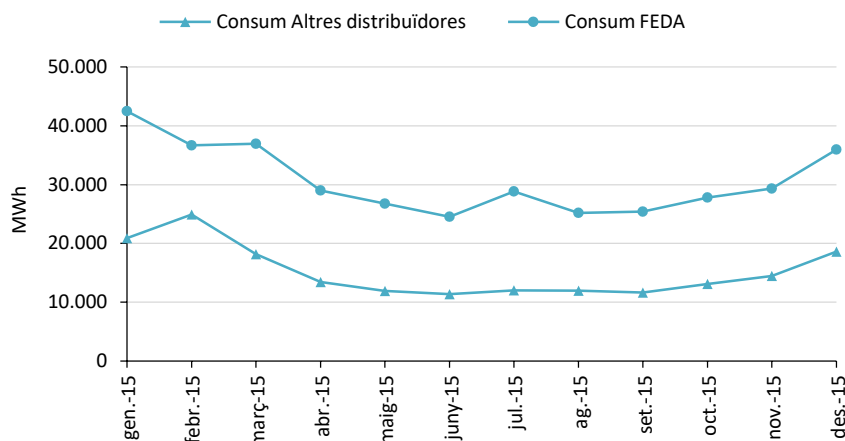


Fig. 2.22. Estacionalitat en el consum d'energia elèctrica final de FEDA i de les altres distribuïdores

El consum d'energia elèctrica final desagregat a escala de país s'ha calculat considerant que la distribució dels consums segons activitats en les altres distribuïdores manté les mateixes proporcions que en les parròquies subministrades per FEDA. Així doncs, en l'any base del model, el consum d'energia elèctrica final del sector secundari i terciari és de 362,70 GWh. El sector terciari predomina clarament sobre el secundari tal com es pot observar en la Fig. 2.23.

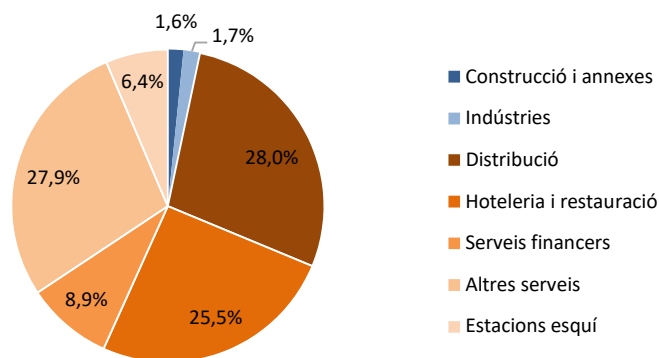


Fig. 2.23. Distribució del consum elèctric dels diferents sectors l'any 2015 (sector terciari en taronja i secundari en blau)

2.6.2 Fuel domèstic

Com s'ha comentat prèviament, no es disposa de dades de consum de fuel domèstic desagregades segons sectors. L'única dada existent és la relativa al total d'importacions anuals (Departament d'Estadística, 2016c). Per aquest motiu, el consum de fuel domèstic del sector secundari i terciari s'ha estimat partint del total d'importacions al país i del càlcul realitzat en la resta de sectors considerats en el model que consumeixen aquest combustible (sector residencial i administració pública). En absència de més detall en aquest sentit, la distribució de les importacions de fuel domèstic entre el sector secundari i terciari s'ha considerat igual que l'observada en l'electricitat (3% i 97% respectivament). La Fig. 2.24 mostra el consum de fuel domèstic estimat en l'any base del model.

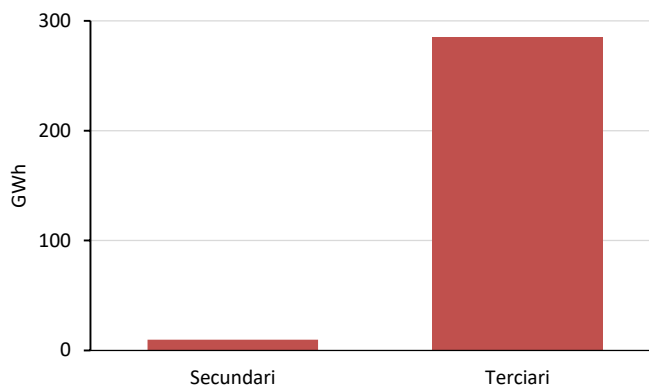


Fig. 2.24. Consum d'energia final de fuel domèstic en el sector secundari i terciari l'any 2015

D'altra banda, en el model s'ha introduït un paràmetre que representa la tendència a l'alça dels consums d'electricitat en detriment del fuel domèstic observada en els darrers

anys en el sector residencial (p.ex. la calefacció elèctrica té un 0,85%/any de penetració). Amb el detall de les dades actuals no es pot afirmar que aquesta tendència es doni també en el sector secundari i terciari. De totes maneres, s'ha considerat necessària la inclusió d'aquest paràmetre per tal de poder estudiar la sensibilitat del model a aquest factor, tenint en consideració un dels riscos del sistema energètic andorrà com és el perill de saturació de les línies d'importació d'energia elèctrica.

2.7 Escenaris de futur

Les seccions anteriors d'aquest capítol descriuen en detall la modelització de l'actual demanda d'energia a Andorra. Aquesta secció explora possibles escenaris de futur. S'inicia amb la definició de l'escenari de referència, el qual serveix de base per a l'anàlisi d'escenaris alternatius, i seguidament s'analitza una bateria de mesures centrades en l'estalvi i l'eficiència energètica i utilitzades com a base per a la definició de l'escenari Eficient.

2.7.1 Escenari de referència

2.7.1.1 Sector residencial

L'escenari de referència ha estat dissenyat com a escenari base respecte el qual es quantifiquen els impactes de les diferents mesures o escenaris analitzats. Aquest té en compte les tendències històriques observades juntament amb les polítiques implementades fins l'actualitat. A continuació es detalla l'evolució considerada dels diferents àmbits del sector residencial en l'escenari Referència.

Calefacció

Es considera que tots els nous habitatges compliran el reglament energètic en l'edificació (BOPA 57/2010). D'altra banda s'assumeix un rati de renovació dels habitatges existents d'un 1%²¹. Aquesta renovació és fruit de la pròpia voluntat dels propietaris així com de l'efecte associat al *Programa Renova* (Govern d'Andorra, 2015), el qual promou la millora de l'eficiència energètica en els edificis existents. Pel que fa a fonts energètiques es manté la tendència a l'alça d'ús d'electricitat observada en l'EPF 2005-2009 (Fig. 2.25).

²¹ Comunicació personal de l'OECC

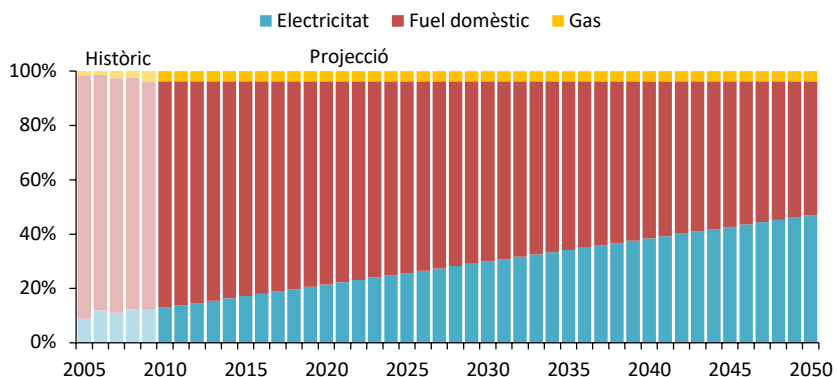


Fig. 2.25. Evolució històrica i projecció de l'ús de fonts energètiques en calefacció

Aigua calenta sanitària

Es considera una millora en el rendiment de les calderes dels habitatges renovats i dels construïts posteriors a 2010 (veure Taula 2.5) incentivada pel nou reglament energètic. A diferència de la calefacció, en ACS s'aprecia una tendència a la baixa en l'ús d'electricitat (EPF 2005-2009). Com es pot observar en la Fig. 2.26, aquesta tendència s'ha mantingut en l'escenari de referència fins que el rati d'ACS i calefacció de fuel domèstic s'igualen (any 2022), moment en el qual es considera que l'ACS de fuel domèstic seguirà el rati de la calefacció d'aquest mateix combustible. L'escenari de referència té en consideració el decret de modificació del reglament de la construcció (BOPA 80/2015) en el qual s'aprova que almenys el 40% de la producció d'ACS ha de provenir d'energies renovables. En el model LEAP-Andorra es considera que aquesta aportació es farà a través d'energia solar tèrmica en tots els habitatges construïts a partir de l'any 2016.

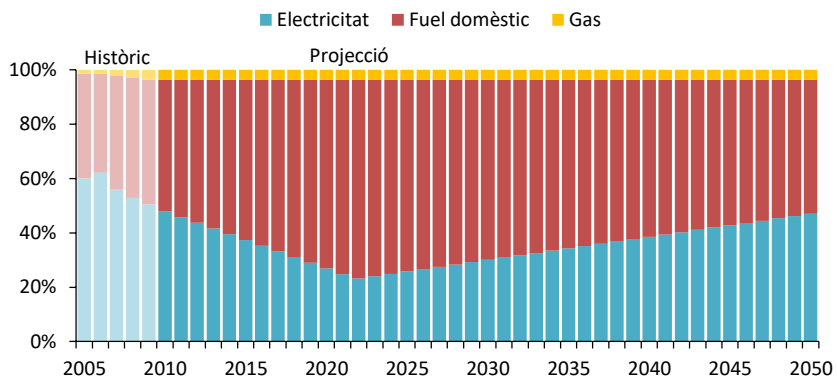


Fig. 2.26. Evolució històrica i projecció de l'ús de fonts energètiques d'ACS en els habitatges existents (final 2015)

Aire condicionat

Tenint en compte canvis en els costums dels ciutadans i considerant la tendència des de l'any 2005 observada en l'EPF, el percentatge d'habitatges amb aire condicionat (AC) es suposa a l'alça assolint un valor màxim del 10% l'any 2050.

Il·luminació

La dinàmica europea reflecteix una tendència decreixent en l'àmbit del consum en la il·luminació, tant per habitatge com per m² (Lapillonne et al., 2015) degut a la millora de l'eficiència energètica dels sistemes d'il·luminació utilitzats en els habitatges. En la base de dades del projecte Odyssee-Mure (Enerdata, 2015), únicament es disposa de la tendència històrica de penetració de bombetes fluorescents compactes de tres països (Holanda, Dinamarca i Eslovènia). Assumint com a valor de tendència de penetració a Andorra la mitjana observada en aquests tres països pel període 2000-2012 (això és, 2,46% anual), l'any 2039 s'aconsegueix que la totalitat de les bombetes dels habitatges siguin de baix consum (Fig. 2.27). Cal assenyalar que en l'escenari de referència, la introducció de la tecnologia LED només s'ha considerat en els habitatges construïts amb posterioritat a l'any 2010.

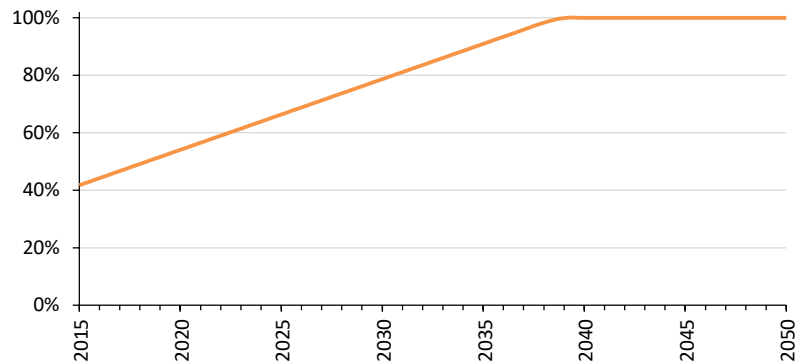


Fig. 2.27. Projecció del rati de bombetes de baix consum en l'estoc d'habitatges del 2010

Cuina

En l'EPF 2005-2009 s'aprecia una significativa penetració de cuines elèctriques d'un 5,2% anual. L'escenari de referència, representat en la Fig. 2.28, considera que aquesta tendència es mantindrà en els propers anys, fet que provoca que l'any 2016 la totalitat dels habitatges utilitzin electricitat en l'àmbit de la cuina. No s'han considerat millores d'eficiència energètica en aquest àmbit.

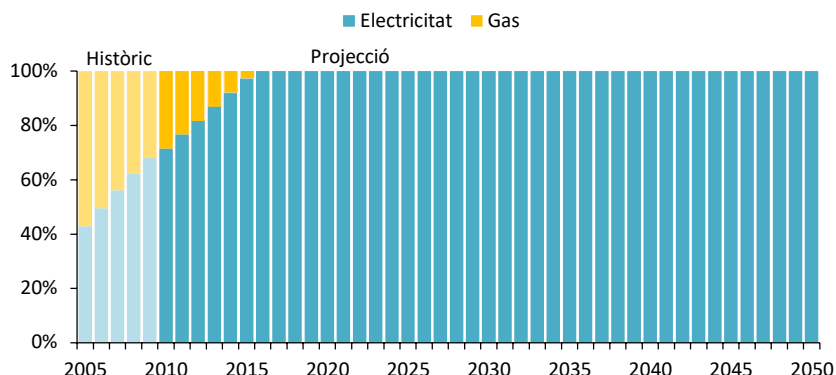


Fig. 2.28. Evolució històrica i projecció de l'ús de fonts energètiques en cuina

Electrodomèstics

D'igual manera que en la caracterització del consum final de l'any base del model, les projeccions en aquest àmbit s'han realitzat de forma independent pels grans i petits electrodomèstics per tal de tenir en consideració les seves dinàmiques diferenciades. Tal com s'observa en la Fig. 2.29, en l'escenari de referència, el grau d'introducció en els habitatges andorrans dels grans electrodomèstics segueix la tendència observada en els últims anys (EPF 2005-2009 i 2010-2012) definida per una funció logarítmica, a excepció dels frigorífics i televisors que actualment ja són presents a la totalitat de les llars havent arribat al nivell considerat de saturació (100%).

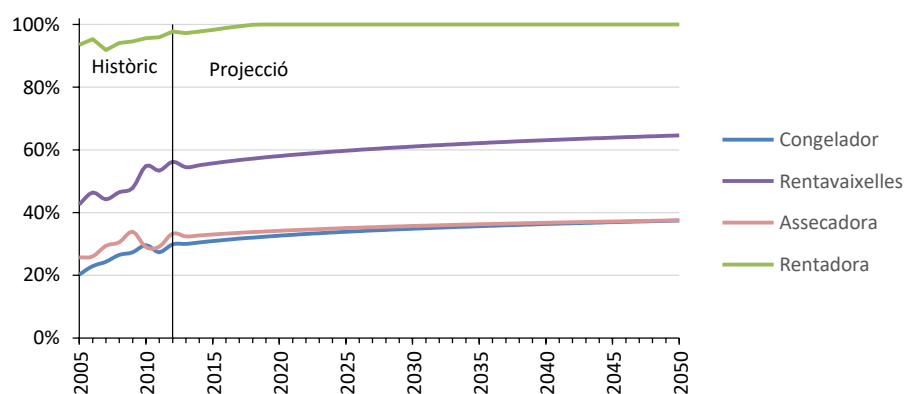


Fig. 2.29. Històric i projecció del rati de penetració dels grans electrodomèstics en les llars andorranes

Pel que fa a consum energètic específic anual dels grans electrodomèstics (kWh/aparell), s'ha considerat que la tendència de millora d'eficiència observada a França durant el període 2000-2012 (Enerdata, 2015) es mantindrà fins l'any 2050. La Fig. 2.30 mostra els valors històrics de consum energètic dels grans electrodomèstics així com la seva projecció fins

l'any 2050. Aquesta s'ha realitzat mitjançant una funció exponencial negativa per representar una major dificultat en assolir millores d'eficiència energètica a mesura que aquesta augmenta. És destacable el cas dels televisors, que tot i haver millorat l'eficiència en els darrers anys, no s'ha traduït en un estalvi d'energia, ja que s'ha tendit a disposar de més televisors en els habitatges, incrementar-ne el temps de visualització i adquirir aparells de major mida (Bertoldi et al., 2012). Aquest canvi de comportament s'ha traduït en un augment continuat en el consum dels televisors des de l'any 2002 fins el 2007, moment en el que s'observa una estabilització. En el model es considera que els consums actuals romandran constants en un futur mantenint la tendència dels darrers anys.

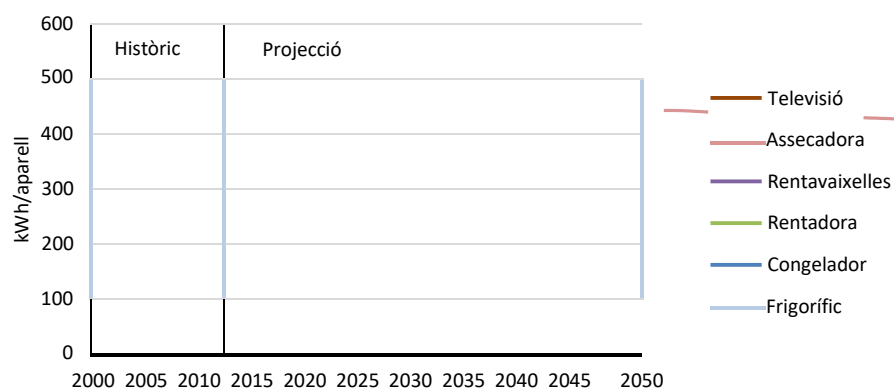


Fig. 2.30. Històric i projecció del consum energètic específic anual dels grans electrodomèstics

L'evolució del consum dels petits electrodomèstics en els habitatges s'ha definit tenint en consideració la tendència observada a França pel període 1990-2012 (Enerdata, 2015). Amb aquesta sèrie històrica s'ha realitzat un ajust logístic mitjançant el mètode de mínims quadrats no lineals (Brown, 2001), obtenint un coeficient de determinació $R^2=0,990$. En la Fig. 2.31 s'observa la projecció del consum energètic final per habitatge dedicat als petits electrodomèstics. La corba logística representa, en una primera fase, un ràpid creixement del consum, seguit d'una desacceleració progressiva quan s'inicia la saturació i una aturada del creixement quan s'arriba a la maduresa (2227 kWh en aquest cas). El valor obtingut en els últims anys de la projecció es troba en un punt entremig dels consums màxims observats actualment a nivell europeu: 2500 i 2096 kWh a Suècia i Regne Unit respectivament (Enerdata, 2015).

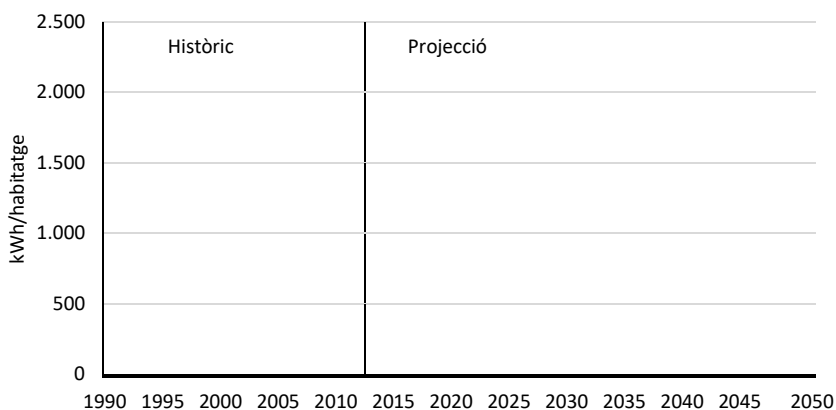


Fig. 2.31. Històric i projecció del consum energètic anual per habitatge dels petits electrodomèstics

2.7.1.2 Sector del transport

L'escenari de referència parteix dels valors calculats en l'any base del model i es construeix tenint en consideració les tendències històriques observades en els diferents subsectors així com les projeccions d'evolució del PIB, la població i el preu de petroli. En els casos en que no es disposa d'informació pròpia del país (p.ex. elasticitats), s'han assumit dades exògenes provinents de revisions bibliogràfiques. A continuació es detalla el procés seguit en cada un dels sub-sectors per tal de construir l'escenari de referència.

Parc de turismes

La projecció del parc de turismes s'ha realitzat a partir del model d'estoc *bottom-up* presentat en la Secció 2.4.1, combinant-lo amb un model economètric (*top-down*), on el preu del combustible i l'evolució econòmica influeixen en el nombre total de turismes del parc, la demanda en mobilitat i les característiques dels vehicles. El model inicial s'ha implementat en un full de càlcul en el qual per cada any (2015-2050) s'actualitza l'estoc, la seva activitat (km/any) i el SEC (MJ/km) de cada categoria de vehicles, mantenint l'alt nivell de segregació (combustible utilitzat, cilindrada i antiguitat) de l'any base del model. Posteriorment, les principals variables i resultats d'aquest model s'han inclòs al LEAP-Andorra per tal de poder analitzar els seus resultats de forma conjunta amb la resta del sector energètic del país. El motiu de la implementació inicial en un full de càlcul és que l'estructura del model desenvolupat obliga a LEAP a haver de referenciar a variables resultants per tal de realitzar el càlcul. Fins l'actualitat, LEAP mostra alguns problemes en vincular resultats a entrades del model tot i que segons els seus desenvolupadors s'espera poder solucionar aquests problemes en properes versions.

El PIB del país i el preu del petroli són les variables conductores del model implementat. En aquest, l'augment del preu del petroli afecta negativament l'estoc total i el perfil d'activitat dels turismes. D'altra banda, l'increment del PIB provoca un augment en l'estoc de turismes, en l'activitat total del parc i en l'adquisició de vehicles de major cilindrada. El diagrama de flux de la Fig. 2.32 mostra de forma resumida el procés de projecció del model.

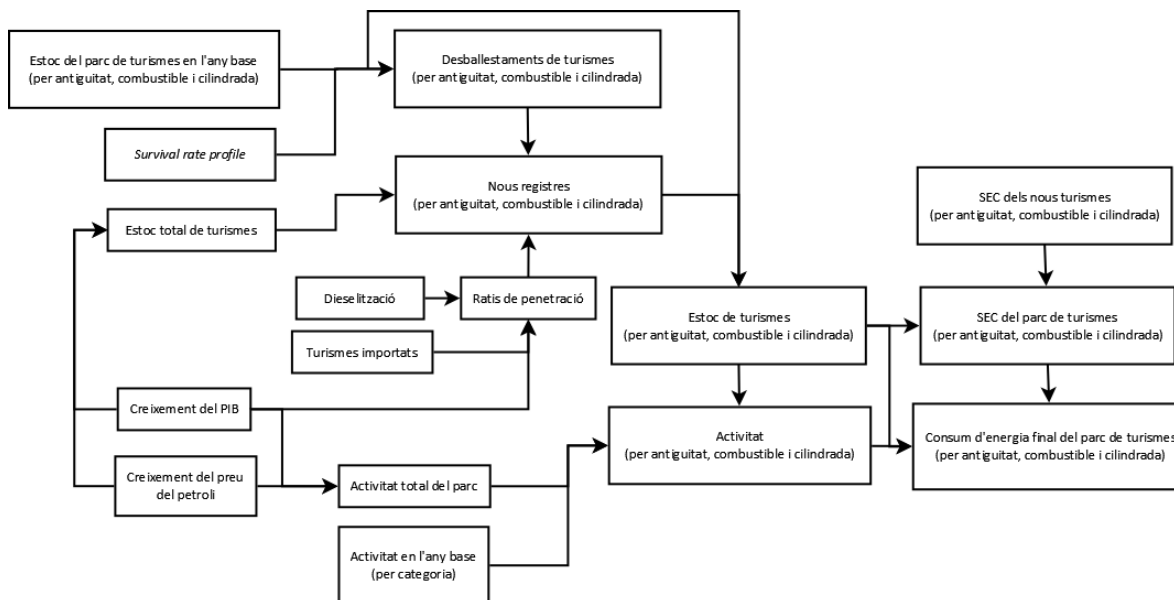


Fig. 2.32. Resum del procés de projecció del model d'estoc de turismes

El procés parteix de l'estructura del parc de turismes l'any base del model (2015). Mitjançant el perfil de retirada de vehicles (*survival rate profile*²²) el model calcula les retirades de turismes de l'any vinent. Paral·lelament, es projecta l'estoc total de turismes fins l'any 2050 en funció del creixement del PIB del país i del preu del petroli. Per definir aquesta tendència s'utilitzen valors d'elasticitat de l'estoc respecte del preu del combustible i dels ingressos (Goodwin et al., 2004). Un cop definits els desballestaments i el nombre de turismes de l'estoc total, els nous registres es calculen segons:

$$\text{Nous registres}(t) = \text{Estoc}(t) - \text{Estoc}(t - 1) + \text{Desballestaments}(t) \quad (2.6)$$

A continuació els nous vehicles s'introdueixen al parc seguint una proporció de cada categoria definida pel creixement del PIB i l'estat inicial en l'any base. En paral·lel, es calcula

²² Pel càlcul del *survival rate* d'Andorra s'han utilitzat les dades de vehicles registrats i retirats durant el període 1985-2015

l'activitat (km/any) de cada categoria de turismes tenint en compte els perfils d'activitat de l'any base i l'evolució de l'activitat total del parc. Aquesta es projecta mitjançant elasticitats de forma homòloga a la descrita en el cas de l'estoc total. D'acord amb Pasaoglu et al. (2012), el model assumeix una millora del SEC dels nous turismes de gasoil i gasolina de l'1,3% des de 2015 a 2020 i del 0,5% pel període 2020-2050. En el cas dels vehicles elèctrics, híbrids i híbrids endollables s'estableix una millora del 0,5% a partir de 2020. Aquests valors parteixen de la regulació existent actual (EC No 443/2009) que estableix límits de CO₂ d'obligatori compliment en la fabricació de vehicles a la UE. D'acord amb els resultats obtinguts en Van den Brink et al. (2001) i les assumpcions considerades en Daly and Ó Gallachóir (2011b), el SEC de cada categoria es incrementa any a any mitjançant l'aplicació d'un factor d'envelliment del 0,3% anual. Basant-se en Travesset-Baro et al. (2015), el salt entre el consum basat en NEDC i el donat en condicions reals, es representa mitjançant un *on-road factor* constant (39,6% per tèrmics i 27,6% per elèctrics) aplicat a tots els turismes del parc. Per últim, es calcula el consum d'energia final del parc de turismes mitjançant l'Eq. 2.6. Travesset-Baro et al. (2016) presenten la metodologia d'implementació del model de forma detallada i els principals resultats obtinguts amb les dades de partida de l'any 2013. Inclou també, un anàlisi d'escenaris que explora possibles variacions en els resultats del model en funció dels paràmetres més sensibles.

Altres consums interns

De manera similar al cas del parc de turismes, la demanda del transport de mercaderies acostuma a estar fortament influenciada per l'activitat econòmica i el preu del combustible (Dunkerley et al., 2014). La projecció de la demanda energètica del transport de mercaderies s'ha desenvolupat mitjançant un model *top-down*, amb el PIB i el preu del petroli com a variables explicatives de la demanda de combustible de totes les categories considerades.

Basant-se en la revisió de més de setanta articles científics amb dades de diferents països, Jong et al. (2010) estableix que l'elasticitat de la demanda respecte el preu del combustible es situa entre uns valors de -0,2 i -0,6. Tenint en compte que Andorra no disposa actualment de cap alternativa al transport de mercaderies per carretera es d'esperar que la demanda respecte el preu del combustible sigui molt poc elàstica, pel que s'assumeix un valor de -0,2 en el model.

Dunkerley et al. (2014) assenyalen que l'elasticitat de la demanda respecte l'activitat econòmica varia entre 0,52 i 1,49 segons els països i períodes de temps estudiats. L'absència de dades històriques desagregades en el sector del transport impedeix disposar d'un valor propi d'Andorra. De totes maneres, assumint la quantitat d'importacions i exportacions com indicador de la demanda energètica del sector del transport de mercaderies es pot observar

un acoblament amb l'evolució del PIB en la major part de la sèrie existent (Fig. 2.33). Finalment, en l'escenari de referència el valor de l'elasticitat de la demanda respecte el PIB es fixa a 1.

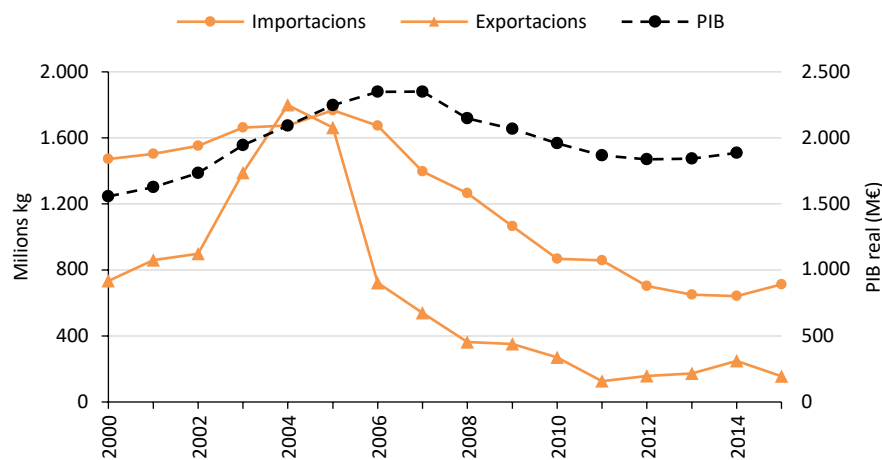


Fig. 2.33. Evolució històrica del PIB, importacions i exportacions

En general l'ús del transport públic, així com el seu consum d'energia, està fortament lligat a l'evolució de la població i al cost del servei (Litman, 2013). La categoria *transport de passatgers* conté diversitat de tipus de vehicles associats a serveis molt diferents pel que és molt difícil estimar-ne el cost dels trajectes i més encara la seva evolució futura. Per realitzar la projecció en l'escenari de referència s'ha seguit la metodologia implementada per Simoes et al. (2013), on la població és la variable conductora del consum d'energia del transport de passatgers amb un valor d'elasticitat igual a 1. El mateix procés s'assumeix pels vehicles a dues rodes però en aquest cas amb una elasticitat de 0,7.

La Taula 2.14 recopila els valors de les elasticitats considerades en la construcció del model de transport en els diferents sub-sectors.

	Preu del petroli	PIB	Població
Transport de mercaderies	-0,2	1	-
Transport de passatgers	-	-	1
Vehicles a dues rodes	-	-	0,7

Taula 2.14. Elasticitats del consum de combustible respecte el preu del petroli, el PIB i la població en l'escenari de referència

Fuel tourism

L'evolució del *fuel tourism* en l'escenari de referència està lligada a la projecció del nombre de visitants (veure Fig. 2.5). S'ha considerat que els ratis de volum de combustible per

visitant de 2015 (6,5 litres/visitant de gasoil i 0,66 litres/visitant de gasolina) es mantenen fins l'any 2050.

2.7.1.3 Administració pública

L'escenari de referència del model LEAP-Andorra considera que l'eficiència energètica dels edificis públics existents es mantindrà en els nivells actuals. D'altra banda, estableix que els equipaments de nova construcció gaudiran de les millores proposades en les auditories, assolint un consum d'energia final mitjà per edifici com el mostrat en la Fig. 2.19. El nombre d'edificis de nova construcció (variable `edificis_post_2015`), parteix de zero l'any base del model i creix proporcionalment a la població. S'ha establert que el rati entre edificis públics i població observat l'any 2015 (0,017 edificis/persona) es mantindrà en un futur. Aquest fet es pot justificar per una ampliació de l'administració degut a l'augment de les necessitats d'una població creixent.

Per modelitzar l'evolució futura de l'enllumenat públic s'han estudiat les sèries històriques de consum d'energia elèctrica segons activitats (Departament d'Estadística, 2016b). L'objectiu és entendre'n la seva evolució i trobar possibles correlacions amb variables exògenes del model com la població o el PIB. Degut a que les variables no segueixen una distribució normal, per tal d'estudiar les possibles correlacions s'ha emprat el test estadístic no paramètric de Rho Spearman.

Analitzant les sèries històriques del període 1993-2015, s'ha trobat una correlació positiva estadísticament significativa entre el consum d'energia elèctrica de l'enllumenat públic i la població resident al país. En aquest sentit, és lògic pensar que el creixement de la superfície urbanitzada deguda a l'increment de població comporti també un augment en les necessitats d'enllumenat. La Taula 2.15 mostra els coeficients de correlació (Rho Spearman) juntament amb el nivell de significança en els casos en que s'ha trobat un alt nivell d'associació entre les variables analitzades.

		Població
Edificis públics	Coeficient de correlació	0,756**
	p-valor	<0,001
Enllumenat públic	Coeficient de correlació	0,769**
	p-valor	<0,001

Taula 2.15. Correlació i nivells de significança del consum d'electricitat amb la població

Els resultats de la Taula 2.15 també confirmen l'alt nivell d'associació existent entre el consum d'energia elèctrica de les administracions i la població. Davant l'absència d'històric de dades de consum de fuel domèstic, la correlació existent entre el consum d'energia

elèctrica i la població dona solidesa a la hipòtesi de vincular l'aparició de nous edificis públics a l'evolució de la població.

Finalment, s'ha modelitzat el comportament del consum d'energia elèctrica de l'enllumenat públic mitjançant una regressió lineal amb la població. Cal assenyalar que s'ha modificat la constant en l'equació de regressió resultant per tal que en l'any base del model la diferència entre l'històric de consums i el model de regressió sigui nul·la.

$$CE_{\text{Enllumenat públic}}(t) = 0,3636 \cdot \text{Població}(t) - 13911,81 \quad \text{MWh} \quad (2.7)$$

Població (habitants)

t Any d'estudi

$R^2 = 0,6722$

2.7.1.4 Sector secundari i terciari

Electricitat

La informació desagregada de consum d'energia elèctrica dels diferents sub-sectors inclosos dins dels sectors secundari i terciari permet estudiar de forma individual les seves sèries històriques. La Taula 2.16 mostra els coeficients de correlació (Rho Spearman) així com el nivell de significança per cada un dels sub-sectors.

		PIB	Població
Construcció	Coeficient de correlació	0,244	0,042
	p-valor	0,401	0,887
Indústries	Coeficient de correlació	-0,407	-0,385
	p-valor	0,149	0,175
Distribució	Coeficient de correlació	0,837**	0,864**
	p-valor	<0,001	<0,001
Hoteleria i restauració	Coeficient de correlació	0,934**	0,930**
	p-valor	<0,001	<0,001
Serveis financers	Coeficient de correlació	0,644*	0,798**
	p-valor	0,013	0,001
Estacions d'esquí	Coeficient de correlació	0,152	0,174
	p-valor	0,605	0,553
Altres serveis	Coeficient de correlació	0,420	0,596*
	p-valor	0,135	0,025

Taula 2.16. Correlació i nivells de significança del consum d'electricitat amb el PIB i la població 1993-2013 (*p < 0,05; **p < 0,01)

Un cop comprovada la correlació, pels casos en que aquesta és significativa, es procedeix a realitzar una regressió lineal simple per tal d'obtenir l'equació que permeti projectar els

consums de cada un dels sectors. Cal apuntar que s'han modificat les constants en les equacions de regressió resultants per tal que en l'any base del model la diferència entre l'històric de consums i els models de regressió sigui nul·la. En valorar els resultats obtinguts, cal tenir present l'escassetat de dades, existint només 14 mesures (N) per cada una de les sèries temporals. Finalment es mostra el valor del coeficient de determinació (R^2) en cada una de les regressions per tal de quantificar l'ajust del model lineal.

A continuació es detalla el comportament observat en cada un dels principals sectors d'activitat consumidors d'energia en el context andorrà.

Construcció

El sector de la construcció i les activitats relacionades representen un 1% del consum elèctric anual del país. Aquest sector ha passat de ser un dels motors econòmics del país a ser un sector en clar retrocés en els darrers anys. El consum elèctric d'aquest sector segueix aquesta mateixa tendència amb un augment fins l'any 2006 seguit d'un retrocés continuat fins l'actualitat. No s'ha trobat cap correlació entre el consum elèctric i les variables avaluades.

Indústries

El sector industrial tan sols representa poc més d'un 1% del consum elèctric anual d'Andorra. Aquest sector té un pes específic poc important en l'economia del país i això es veu reflectit també en els consums elèctrics. Sense entrar a analitzar les variacions interanuals, la tendència anual històrica és d'una lleugera disminució que es podria explicar en millores d'eficiència energètica en els processos industrials i per la recessió econòmica en els darrers anys. No s'ha trobat cap correlació entre el consum d'aquest sector i la resta de variables avaluades.

Distribució

La distribució aglutina l'activitat comercial desenvolupada en grans magatzems i botigues i representa actualment un 19% del consum d'energia elèctrica nacional, essent el principal consumidor dins el sector terciari. Aquesta activitat està molt lligada al turisme que és un dels pilars de l'economia andorrana, però també a la població resident al país. En aquest sentit, s'ha trobat una correlació positiva significativa entre l'evolució del consum elèctric d'aquest sector i la població i també en menor mesura amb el PIB. Així doncs, s'ha modelitzat el comportament del consum d'aquest sector mitjançant una regressió lineal amb la població.

$$CE_{Distribució}(t) = 1,5404 \cdot Població(t) - 9030,72 \quad \text{MWh} \quad (2.8)$$

Població (habitants)

t Any d'estudi

$R^2 = 0,792$

Hoteleria i restauració

Aquest sector representa el 17% del consum anual d'electricitat i la seva evolució entre els anys 2000 i 2015 mostra un fort augment fins al 2007 seguit d'una contracció i una lleugera estabilització en els darrers anys. Aquesta activitat econòmica està gairebé íntegrament lligada al turisme. En aquest sentit, s'ha trobat una correlació positiva significativa entre l'evolució del consum elèctric d'aquest sector i la del PIB d'Andorra. Així doncs, s'ha modelitzat el comportament del consum d'aquest sector mitjançant una regressió lineal amb el PIB com a variable predictiva.

$$CE_{hoteleria-restauració}(t) = 39,045 \cdot PIB(t) + 17779,94 \quad \text{MWh} \quad (2.9)$$

PIB (M€)

t Any d'estudi

$R^2 = 0,797$

Serveis financers

Els serveis financers representen un 6% del consum elèctric anual. L'evolució històrica creixent d'aquest sector assoleix el seu màxim l'any 2007. A partir d'aquest moment s'inverteix la tendència i s'inicia un període de decreixement fins l'actualitat. Existeix una correlació positiva estadísticament significativa entre l'evolució del consum d'aquest sector i la de la població i també amb una intensitat menor amb el PIB. Així doncs, s'ha modelitzat el comportament del consum elèctric d'aquest sector mitjançant una regressió lineal amb la població.

$$CE_{Serveis\ financers}(t) = 0,8617 \cdot Població(t) - 29411,58 \quad \text{MWh} \quad (2.10)$$

Població (habitants)

t Any d'estudi

$R^2 = 0,859$

Estacions d'esquí

Les estacions d'esquí representen un 4% del consum elèctric anual. L'evolució històrica d'aquest sector és d'un lleuger descens del seu consum encara que existeix una important variabilitat interanual. Cal destacar que un dels consums elèctrics importants de les estacions d'esquí es relaciona amb la fabricació de la neu de cultiu i que aquesta depèn molt de condicionants climatològics. Aquest pot ser un motiu pels quals no s'ha trobat cap correlació estadísticament significativa amb les variables avaluades. Un factor a tenir present en els propers anys és el canvi climàtic, el qual podria incrementar els consums energètics de les estacions degut a la major exigència de producció de neu artificial (Pons-Pons et al., 2011).

Altres serveis

La resta de sectors no considerats anteriorment representen conjuntament un 18% del consum elèctric anual. L'evolució històrica del seu consum mostra una tendència a l'alça fins l'any 2010 i una estabilització i un decreixement en els darrers anys. S'ha trobat una correlació positiva estadísticament significativa entre l'evolució del consum d'aquestes activitats i l'evolució de la població andorrana. Així doncs, s'ha modelitzat el comportament del consum elèctric d'aquest sector mitjançant una regressió lineal amb la població.

$$CE_{Altres\ serveis}(t) = 1,9718 \cdot Població(t) - 40289,96 \text{ MWh} \quad (2.11)$$

Població (habitants)

t Any d'estudi

R²= 0,692

Fuel domèstic

La projecció del consum de fuel domèstic dels sectors secundari i terciari s'ha realitzat de forma agregada. Mitjançant l'històric d'importacions (2000-2013) relatives a aquests sectors s'ha estudiat la seva correlació amb la població i el PIB. La Taula 2.17 mostra els coeficients de correlació (Rho Spearman) així com el nivell de significança del consum de fuel domèstic amb les variables estudiades.

		PIB	Població
Terciari i secundari	Coefficient de correlació	0,710**	0,609*
	p-valor	0,004	0,021

Taula 2.17. Correlació i nivells de significança del consum de fuel domèstic amb el PIB i la població (*p < 0,05;

**p < 0,01)

Les importacions de fuel domèstic es van incrementar de forma continuada des de l'any 2000, assolint el 2005 el seu màxim històric. En aquest moment es produeix un important descens en les importacions seguit d'una estabilització en els darrers anys. Actualment les importacions de fuel domèstic són un 20% inferiors a les de 2005. Analitzant la seva evolució històrica s'ha trobat una correlació positiva estadísticament significativa entre l'evolució del consum de fuel domèstic i el PIB. Així doncs, s'ha modelitzat el comportament del consum agregat de fuel domèstic del sector secundari i terciari mitjançant una regressió lineal amb el PIB. A continuació es mostra l'equació de regressió obtinguda i el valor del coeficient de determinació (R^2).

$$CF_{\text{Secundari i terciari}}(t) = 0,0865 \cdot PIB(t) + 154,588 \text{ MWh} \quad (2.12)$$

PIB (M€)

t Any d'estudi

$R^2 = 0,483$

Per tal de caracteritzar de forma separada els dos sectors s'ha considerat que la proporció de fuel de cada sector mantindrà en un futur els valors de 2015 (3% i 97% pel sector secundari i terciari respectivament).

2.7.2 Mesures d'estalvi i eficiència energètica

La Taula 2.18 recull les mesures d'estalvi i eficiència energètica analitzades en el model LEAP-Andorra en els diferents sectors i centrades en l'àmbit de la demanda.

Sector	Sub-sector	Identificador LEAP-	Mesura d'estalvi
Residencial	Calefacció	R1	Renovació d'habitatges
		R2	Introducció calderes biomassa
	ACS	R3	Introducció solar tèrmica
	AC		
	Il·luminació	R4	Introducció de tecnologia LED
	Cuina Electrodomèstics		
Transport	Parc de turismes	TR1	Transició cap a turismes de menor cilindrada
		TR2	Major renovació del parc
		TR3	Reducció de l'activitat
		TR4	Eco-driving
		TR5	Introducció de vehicles elèctrics (50% vendes)
		TR6	Introducció de vehicles elèctrics (50% d'estoc)
	Transport mercaderies	TR7	Contenció de l'activitat
	Transport de passatgers		
Vehicles a dues rodes	TR8	Introducció de motos elèctriques	
Fuel tourism			
Secundari			
Terciari		T1	Millora d'eficiència terciari
Administració pública	Enllumenat públic	AP1	Millora d'eficiència en l'enllumenat
	Edificis	AP2	Milliores constructives i en els sistemes de calefacció
		AP3	Milliores en l'il·luminació
		AP4	Milliores en la refrigeració
		AP5	Milliores en la ventilació

Taula 2.18. Mesures d'estalvi i eficiència energètica implementades en el model LEAP-Andorra

2.7.3 Escenari Eficient

En l'actualitat el model LEAP-Andorra disposa d'un escenari alternatiu en l'àmbit de la demanda energètica, l'escenari Eficient. Aquest integra una bateria de mesures d'estalvi d'energia i emissions de CO₂. La Taula 2.19 mostra les mesures implementades i les compara amb l'escenari de referència.

Identificador LEAP-Andorra	Escenari Eficient	Escenari Referència
R1	100% d'habitatges renovats l'any 2050	1% anual de renovació
R2	30% de calefacció amb biomassa el 2050 en detriment del fuel domèstic	0% el 2050
R3	40% de les necessitats d'ACS amb solar tèrmica en tots els habitatges l'any 2050	Únicament en els habitatges post 2015
R4	50% d'il·luminació LED el 2050 en els habitatges construïts fins l'any 2010	Únicament en els habitatges post 2010
TR1	Percentatge de vendes l'any 2050: Gasoil <1400cc= 50% Gasoil 1400cc-2000cc= 40% Gasoil >2000cc= 10% Gasolina <1400cc= 60% Gasolina 1400cc-2000cc= 30% Gasolina >2000cc= 10%	Percentatge de vendes l'any 2050: Gasoil <1400cc= 6% Gasoil 1400cc-2000cc= 60% Gasoil >2000cc= 34% Gasolina <1400cc= 45% Gasolina 1400cc-2000cc= 28% Gasolina >2000cc= 27%
TR2	Esperança de vida vehicles= 12 anys	Esperança de vida 1985-2015= 17,5 anys
TR3	Reducció d'un 5% de l'activitat total del parc (km/any) pel període 2015-2050	Increment d'un 1,6%
TR4	Millora lineal de l' <i>on-road</i> factor fins l'any 2050. Basat en estil de conducció "calmat" (Travasset-Baro et al. 2015)	<i>On-road</i> factor constant
TR6	50% d'estoc de vehicles elèctrics l'any 2050* (introduïts segons funció logística)	Proporció actual de vendes (0,1%)
TR7	Demanda total (km/any) constant a nivells actuals	Increment lligat al creixement del PIB
TR8	50% d'estoc de motos elèctriques l'any 2050 (introduïdes segons funció logística)	Proporció actual d'estoc (0,1%)
T1	Estalvis de magnitud equivalent al residencial en electricitat i fuel domèstic	Consums lligats a l'evolució del PIB i la població
AP1	50% d'estalvi respecte l'escenari de referència*	Increment lligat al creixement de la població
AP2	Milliores aplicades al 100% dels edificis l'any 2030	Evolució del nombre d'edificis en relació a la població
AP3		
AP4		
AP5		

Taula 2.19. Mesures implementades en l'escenari Eficient del model LEAP-Andorra (*mesures basades en objectius definits en el Llibre Blanc de l'Energia)

2.8 Resultats i discussió

Aquesta secció presenta el consum d'energia final i emissions de GEH del conjunt del sistema energètic d'Andorra en els dos escenaris implementats. Inclou l'anàlisi individual de l'estalvi aportat per les diferents mesures d'eficiència energètica avaluades. Els resultats dels escenaris presentats a continuació es centren en l'àmbit de la demanda i tot i incloure

l'abastiment d'energia per tal de representar la globalitat del sector energètic, no consideren variacions en la seva estructura respecte l'any base del model. L'anàlisi d'escenaris centrat en l'abastiment d'energia es desenvolupa en detall en el Capítol 3.

2.8.1 Escenari de referència

La Fig. 2.34 mostra la projecció del consum d'energia final segregat segons fonts energètiques en l'escenari de referència del model LEAP-Andorra. La previsió estima un creixement global del 18% fins l'any 2050, estimulat principalment per l'evolució econòmica favorable i el creixement demogràfic. A destacar, l'increment en el consum d'electricitat (67%), única font amb un augment considerable. En la resta, les variacions són moderades, a excepció de la gasolina que disminueix en un 44%.

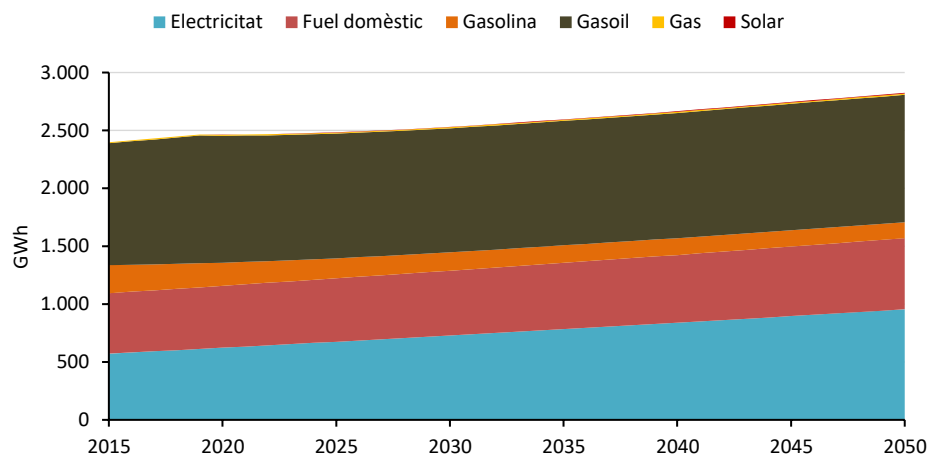


Fig. 2.34. Consum d'energia final en l'escenari Referència segregat segons fonts energètiques

En l'any base, la desviació entre el consum final global aportat pel model i el balanç energètic oficial (Departament d'Estadística, 2016d) és inferior a l'1%. Aquesta petita diferència es deguda a la modelització *bottom-up* realitzada en el sector residencial, el transport i l'administració pública. A continuació es detalla l'evolució del consum d'energia final (veure Fig. 2.35) i les emissions de GEH (veure Fig. 2.36) en els principals sectors d'activitat del país.

Sector residencial

El consum d'energia final del sector residencial creix un 32% fins l'any 2050 en l'escenari Referència tot i la recent implantació del reglament energètic de l'edificació (BOPA 57/2010). L'increment en el nombre d'habitatges, de 30013 l'any 2015 a 45786 el 2050, estimulat pel

creixement de la població té major influència en el consum d'energia final que les millores d'eficiència aportades per la nova regulació. El baix rati de renovació dels habitatges construïts (1%) contribueix a la contenció del consum residencial de forma molt moderada. En la Taula 2.20 es pot observar un dels efectes de la introducció de la nova regulació. Degut a les noves restriccions en les característiques constructives dels habitatges, es produeix una disminució del pes de la calefacció sobre el total del consum final en el sector residencial (del 51% l'any 2015 al 45% el 2050). Les millores d'eficiència en la il·luminació fan que aquest àmbit redueixi progressivament el seu pes sobre el total del consum residencial. D'altra banda, els electrodomèstics passen d'un 25% a un 31% del pes impulsats per l'augment de presència en els habitatges de petits electrodomèstics.

Sector del transport

El sector del transport representa el 54% de l'energia final consumida a Andorra l'any base del model. La reducció del consum d'energia final del parc de turismes (veure Taula 2.20) és la causa de que aquest sector disminueixi un 5% el seu consum total respecte el 2015. S'observa una forta caiguda del consum del parc de turismes tot i els increments projectats en l'estoc (de 50730 a 56712 vehicles) i en l'activitat dels turismes (de 534 a 542 milions de km l'any) guiats per l'evolució econòmica i els preus del petroli. L'escenari de referència considera una introducció molt moderada de noves tecnologies (vehicles híbrids, híbrids endollables i elèctrics) seguint les tendències observades en els últims anys. Tot i això s'assoleix un estalvi significatiu en el consum del parc de turismes degut a les previsions de millora de l'eficiència energètica dels vehicles de combustió. Tant el transport de mercaderies com el de passatgers veuen incrementat el seu consum final, així com també els vehicles a dues rodes. Per la seva banda, el *fuel tourism* incrementa encara més el seu pes degut al fort creixement de turistes previst fins l'any 2020, passant de representar el 45% del consum total del transport al 54% l'any 2050. Aquest factor evita una reducció considerable del consum d'energia final del transport. La no comptabilització de les emissions del *fuel tourism* provoca que els estalvis energètics aportats pel parc de turismes es vegin traduïts en una important disminució de les emissions de GEH del sector del transport.

Sector secundari i terciari

L'any 2015 el sector terciari representa un 27% del consum final d'energia del país. Per la seva banda, amb un 1% del consum, el sector secundari té un pes pràcticament marginal en la demanda d'energia nacional. Tal com s'explica en la Secció 2.7.1.4, la modelització dels consums en els sectors secundari i terciari es realitza mitjançant correlacions amb el PIB i la

població, resultant en un increment pel període 2015-2050 d'un 19% i un 52% respectivament.

Administració pública

L'administració pública representa únicament el 4% del consum d'energia final del país. El seu consum es degut principalment als edificis públics existents i en menor mesura a l'enllumenat públic. Aquest últim es preveu que dupli el seu consum en l'escenari Referència a un horitzó 2050. Val a dir que, tal com mostra la Fig. 2.20, l'enllumenat públic ha triplicat el seu consum en els últims 20 anys. Com a resultat de l'increment de població es preveu que es construeixin 63 nous edificis públics, els quals són els principals responsables de l'increment projectat del 39% del consum d'energia final de l'administració pública.

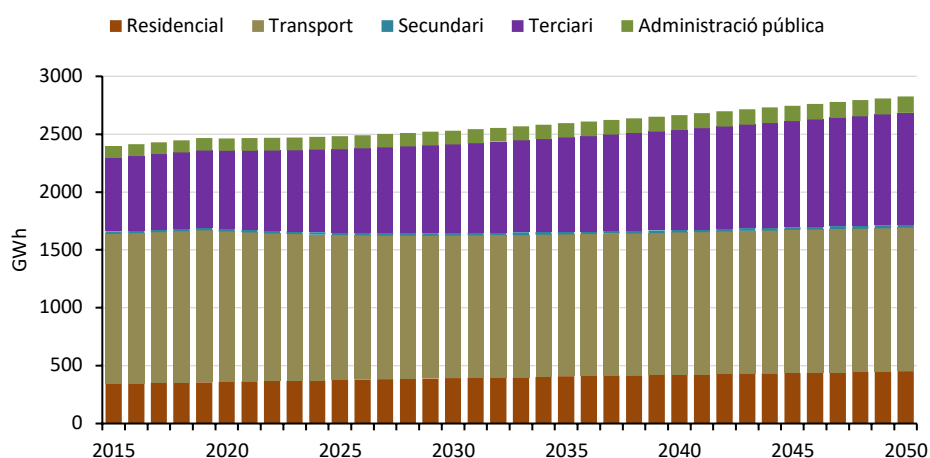


Fig. 2.35. Consum d'energia final en l'escenari Referència segregat segons sectors d'activitat

La Fig. 2.36 mostra les emissions de GEH actuals del sistema energètic andorrà així com la seva projecció en l'escenari Referència fins l'any 2050. L'any base del model, les emissions ascendeixen a 441247 tCO₂eq, el que equival a unes emissions per càpita anuals de 6,2 tCO₂eq/habitant. Aquest valor es troba en la línia dels observats l'any 2015 a Espanya (6,2 tCO₂/habitant i sensiblement superior al de França (5,7 tCO₂/habitant) (Eurostat, 2017).

Tot i el lleuger descens en els primers anys de la projecció estimat pel sector del transport, les emissions nacionals de GEH augmenten un 14% fins l'any 2050. Aquest increment és menor que l'obtingut en el consum d'energia final (18%) degut a dos factors: (1) la tendència de substitució de fuel domèstic per electricitat en el sector residencial, la qual té un menor factor d'emissions (181 gCO₂eq/kWh el 2015) i (2) la diferent

comptabilització d'energia i emissions en el cas del *fuel tourism*, fet que evita un increment d'emissions associat a aquest factor i provocat per l'augment de visitants.

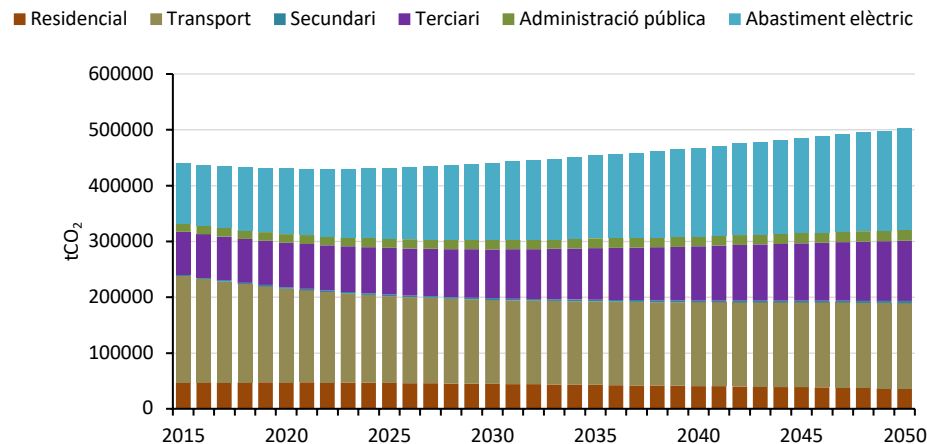


Fig. 2.36. GEH en l'escenari Referència segregat segons sectors d'activitat

Com es pot observar en la Fig. 2.36 les emissions de l'electricitat no es consideren en el punt de consum final sinó en el mòdul d'abastiment elèctric. Tal com s'explica en la Secció 2.1.1, s'han inclòs les emissions relatives a les importacions d'Espanya i França per evitar una subestimació de les emissions reals generades per l'electricitat emprada a Andorra.

2.8.2 Mesures d'estalvi i eficiència energètica

La Fig. 2.37 mostra l'estalvi d'energia i emissions aportat per les diferents polítiques analitzades. Entre les mesures estudiades hi destaquen la introducció de vehicles elèctrics (TR5 i TR6) pel seu gran potencial d'estalvi tant d'energia com d'emissions. La diferència entre ambdós mesures és que la segona considera que l'any 2050 un 50% de l'estoc de turismes serà elèctric mentre que la primera assumeix el valor del 50% sobre el total de les vendes. Aquesta última consideració faria que els vehicles elèctrics representessin el 25% de l'estoc del parc de turismes al 2050.

Entre les mesures analitzades amb menor potencial d'estalvi hi trobem la introducció d'il·luminació LED en el sector residencial (R4) i les millores en refrigeració i ventilació en els edificis públics (AP4 i AP5). Tot i la millora d'eficiència aportada per aquestes mesures, el poc pes relatiu d'aquests àmbits en el consum d'energia nacional en limita la seva capacitat d'influència.

D'altra banda, en la Fig. 2.37 es poden identificar algunes mesures amb un potencial d'estalvi d'emissions important però amb un insignificant estalvi d'energia. És el cas de

polítiques centrades en la substitució de combustibles fòssils per fonts renovables com la introducció de calderes de biomassa i la instal·lació d'energia solar tèrmica per l'ACS residencial.

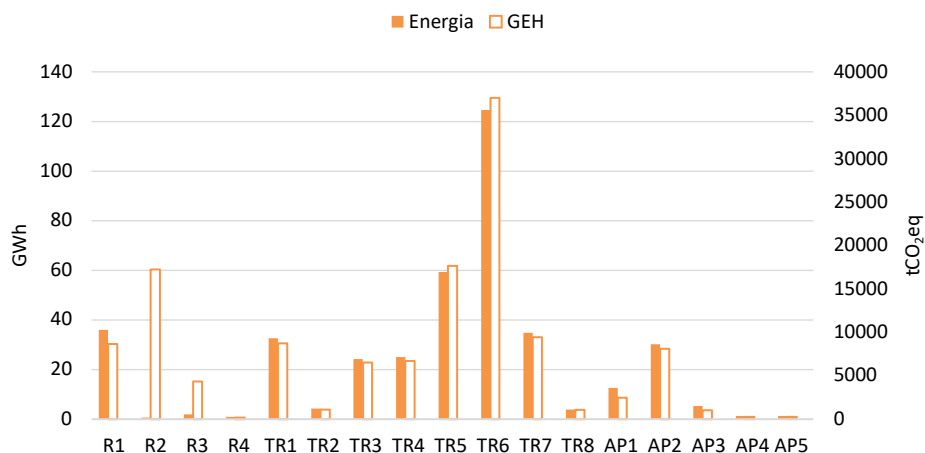


Fig. 2.37. Estalvis d'energia i emissions l'any 2050 respecte l'escenari Referència de les diferents mesures analitzades (veure Taula 2.18 per relacionar identificador i mesura d'estalvi)

La Fig. 2.38 agrupa l'estalvi aportat per les diferents mesures analitzades segons sectors d'activitat i mostra el consum d'energia final i les emissions de GEH de l'escenari Eficient. Cal assenyalar que tot i analitzar dos escenaris individuals d'introducció de vehicles elèctrics en el sector del transport, en l'escenari agregat únicament s'ha considerat una de les mesures. S'ha optat per incloure la mesura més ambiciosa (TR6) per seguir les directrius del Llibre Blanc de l'Energia (Govern d'Andorra, 2012a). Val a dir però que aquest objectiu és aparentment molt ambiciós ja que segons el model implementat, disposar del 50% de vehicles elèctrics en l'estoc representaria que el 77% dels turismes venuts l'any 2050 fossin elèctrics. L'any 2015, Noruega i Holanda van ser els dos únics països amb quotes de mercat superiors al 5%, amb un 24% i un 10% respectivament (OECD/IEA, 2016).

Com és d'esperar, els sectors amb més potencial d'estalvi són els que tenen un major pes en el total del consum d'energia final del país. Així doncs, el transport és el sector amb més capacitat de reducció d'energia i emissions, seguit del terciari, el residencial i l'administració pública.

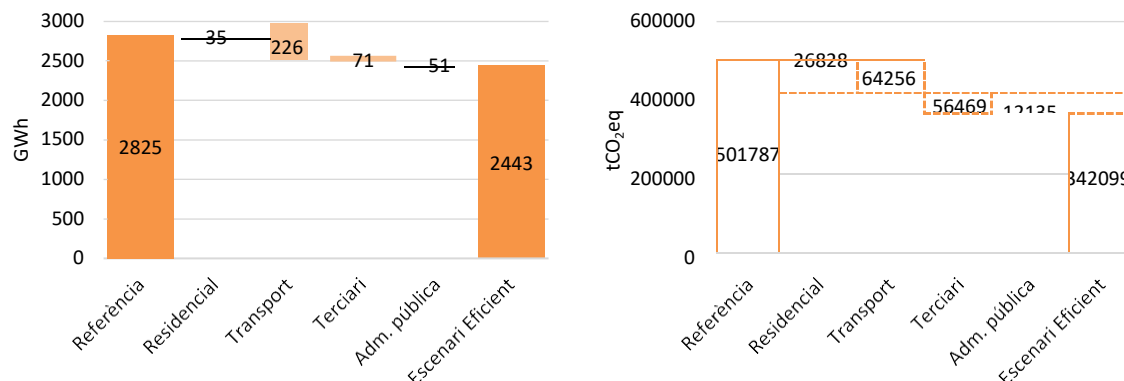


Fig. 2.38. Estalvi d'energia i emissions l'any 2050 respecte l'escenari Referència aportat pels principals sectors

En alguns casos, mesures d'eficiència energètica en un àmbit redueixen el potencial d'estalvi en una altra àrea. Això es coneix com a *double-counting* (Rogan et al., 2013) i apareix quan l'efecte combinat de diferents mesures és inferior a la suma dels efectes per separat. En el model LEAP-Andorra es dona aquest fenomen en el sector residencial, on les millores constructives redueixen el potencial d'estalvi de la introducció de sistemes de generació de calor més eficients i viceversa. El sector del transport també es veu afectat pel *double-counting* ja que la reducció de la distància anual recorreguda pel total del parc de turismes minimitza el potencial d'estalvi de mesures com la introducció de vehicles elèctrics, la transició cap a vehicles de menor cilindrada o la major renovació del parc.

2.8.3 Escenari Eficient

Tal com es descriu en la Secció 2.7.3, l'escenari Eficient inclou un conjunt de mesures d'estalvi i eficiència energètica aplicades en els diferents sectors. En la Fig. 2.39 es pot observar com el consum d'energia final es manté estable (1,8% d'increment) en tot el període d'anàlisi. Aquests resultats mostren un 13,5% d'estalvi d'energia final respecte l'escenari de referència. Els majors estalvis es donen en el fuel domèstic, la gasolina i el gasoil, mentre l'electricitat manté la tònica creixent observada en l'escenari Referència. En aquest cas, tot i aplicar-se mesures d'eficiència energètica, la introducció massiva de vehicles elèctrics incrementa el consum d'electricitat del sector del transport i compensa els estalvis assolits en els altres sectors. D'altra banda incrementen considerablement els pesos de la biomassa i la solar, insignificants en l'any base del model.

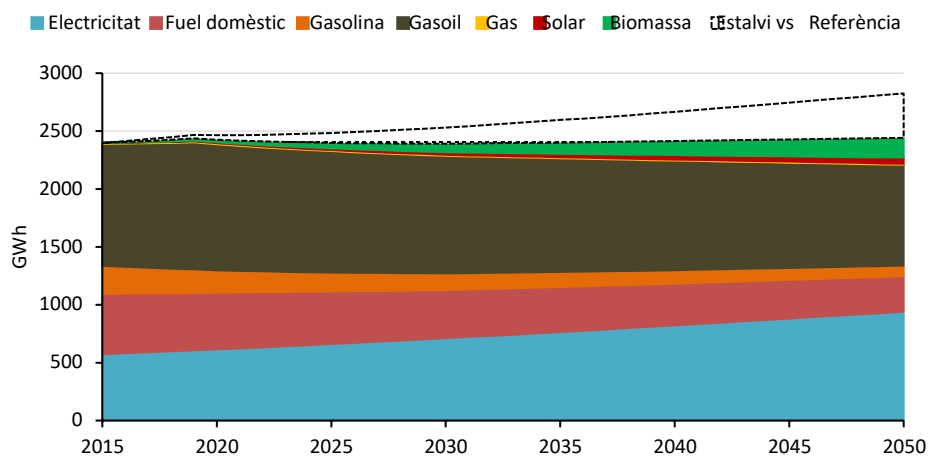


Fig. 2.39. Consum d'energia final en l'escenari Eficient segregat segons fonts energètiques

A nivell sectorial, l'administració pública és la que registra un major estalvi relatiu (36% respecte l'escenari Referència) tot i que el poc pes d'aquest sector fa que l'impacte respecte el total d'energia sigui molt més limitat (1,8%). Com s'observa en la Taula 2.20 el sector residencial concentra la major part dels estalvis en l'àmbit de la calefacció. Degut a la modelització *top-down* del sector terciari, els estalvis resultants no reflecteixen mesures polítiques concretes sinó que s'obtenen d'aplicar estalvis de magnitud equivalent al sector residencial en electricitat i fuel domèstic. D'igual manera que el residencial, el sector del transport concentra la major part dels estalvis en un sub-sector, en aquest cas, en el parc de turismes.

En l'escenari Eficient s'ha estudiat el *double-counting* simulant per separat cada una de les mesures implementades i a continuació comparant la suma dels seus estalvis amb els obtinguts en l'escenari agregat. El valor obtingut ascendeix a 28 GWh, reduint-se en un 8% el potencial d'estalvi d'energia de la suma de les mesures analitzades individualment.

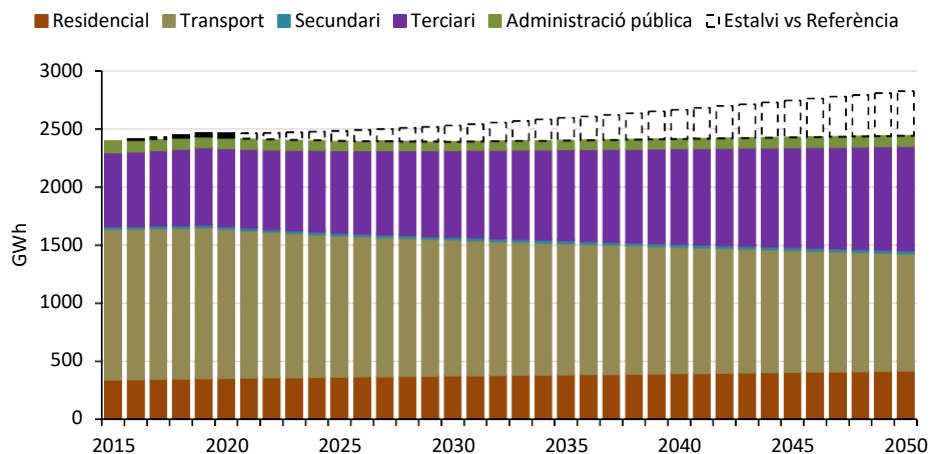


Fig. 2.40. Consum d'energia final en l'escenari Eficient segregat segons sectors d'activitat

La Fig. 2.41 mostra les emissions de GEH en l'escenari Eficient així com l'estalvi respecte l'escenari de referència. L'estalvi total d'emissions aportat per aquest escenari és de 159688 tCO₂eq, el que representa un 32% de reducció respecte l'escenari Referència. L'estalvi percentual obtingut és major que en el cas de l'energia final (veure Fig. 2.40) degut a que algunes mesures incloses en l'escenari Eficient aporten major estalvi d'emissions que d'energia (p.ex. introducció de calderes de biomassa, introducció de vehicles elèctrics).

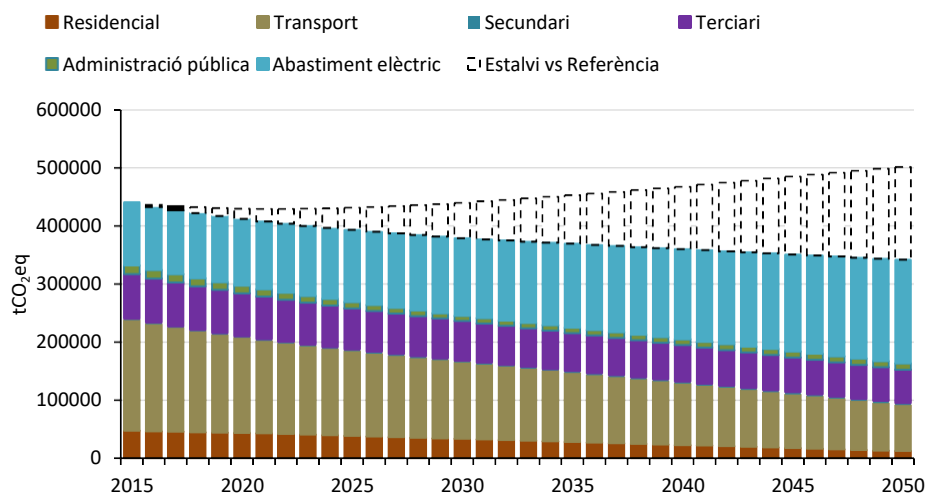


Fig. 2.41. GEH en l'escenari Eficient segregat segons sectors d'activitat

El mes d'abril de 2015, Andorra va presentar la Contribució Prevista i Determinada a Nivell Nacional (INDC, per les seves sigles en anglès) a les Nacions Unides, on es compromet a la reducció de GEH en un 37% l'any 2030 respecte l'escenari de referència. Els

resultats obtinguts en l'escenari Eficient mostren un potencial d'estalvi de GEH l'any 2030 d'un 14% respecte l'escenari Referència, deixant palesa la dificultat d'assolir els compromisos climàtics establerts en l'INDC. Cal remarcar però, que aquest escenari no considera mesures polítiques destinades a l'abastiment elèctric. Tal com s'observa en la Fig. 2.41, en l'escenari Eficient aquest àmbit passa a representar la principal font d'emissions l'any 2050 (52% del total) i per tant un àmbit amb un important potencial en la reducció d'emissions de GEH.

En el Capítol 3 es modelitza i s'estudia en profunditat l'abastiment d'energia i molt particularment la generació i importacions d'energia elèctrica.

Sector	Sub-sector	Any base (2015)		Referència 2050		Eficient 2050	
		Energia (GWh)	GEH (tCO ₂ eq)	Energia (GWh)	GEH (tCO ₂ eq)	Energia (GWh)	GEH (tCO ₂ eq)
Residencial	Calefacció	176	39768	203	30159	172	10435
	ACS	42	7388	57	6385	55	1912
	AC	<1	0	<1	0	<1	0
	Il·luminació	10	0	4	0	3	0
	Cuina	31	186	47	0	47	0
	Electrodomèstics	85	0	142	0	142	0
Transport	Parc de turismes	572	152116	376	100704	190	38158
	Transport de mercaderies	108	29230	143	38653	106	28683
	Transport de passatgers	26	6986	39	10536	39	10536
	Vehicles a dues rodes	9	2246	12	2995	8	1682
	Fuel tourism	583	0	669	0	669	0
Secundari		22	2603	26	3683	26	3683
Terciari		636	76518	967	108264	896	57409
Adm. pública	Enllumenat públic	12	0	25	0	13	0
	Edificis	89	15332	116	19009	77	10911
Abast. Elèctric	Generació elèctrica		15520		14381		14381
	Importacions		93355		167016		164308
Total		2399	441247	2825	501787	2442	342099

Taula 2.20. Consum d'energia final i GEH pels anys 2015 i 2050 segregats segons escenaris i sectors

2.9 Referències

- Bertoldi, P., Hirl, B., Labanca, N., 2012. Energy Efficiency Status Report 2012. doi:10.2788/37564
- Brown, A.M., 2001. A step-by-step guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet. *Comput. Methods Programs Biomed.* 65, 191–200. doi:10.1016/S0169-2607(00)00124-3
- COAA, SaAS, 2012. Quantificació del potencial d'eficiència energètica en el sector de l'edificació a Andorra (informe no públic).
- Daly, H., Ó Gallachóir, B.P., 2011a. Modelling private car energy demand using a technological car stock model. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 16, 93–101. doi:10.1016/j.trd.2010.08.009
- Daly, H., Ó Gallachóir, B.P., 2011b. Modelling future private car energy demand in Ireland. *Energy Policy* 39, 7815–7824. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.027
- Davis, S., Diegel, S., Boundy, R., 2014. *Transportation Energy Data Book Edition 33.*
- Departament d'Estadística, 2016a. Govern d'Andorra. URL: <http://www.estadistica.ad> (accessed 3.23.16).
- Departament d'Estadística, 2016b. Consum d'energia elèctrica. URL: <http://www.estadistica.ad> (accessed 3.30.16).
- Departament d'Estadística, 2016c. Importacions de carburants (Litres). URL: <http://www.estadistica.ad> (accessed 3.30.16).
- Departament d'Estadística, 2016d. Consum d'energia en tep. URL: <http://www.estadistica.ad> (accessed 6.30.16).
- Departament d'Indústria, 2016. Ministeri d'Economia i Territori. Govern d'Andorra.
- Dunkerley, F., Rohr, C., Daly, A., 2014. Road traffic demand elasticities A rapid evidence assessment.
- EIA, 2015. *Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040.* Washington, USA.
- Enerdata, 2015. ODYSSEE database on energy efficiency data & indicators. URL: <http://odyssee.enerdata.net/> (accessed 7.20.15).
- European Commission, 2011. *Energy roadmap 2050. Impact assessment and scenario analysis.* Brussels.
- Eurostat, 2017. Eurostat Databse. Your key to European statistics. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (accessed 5.12.17).

- Gobierno de España, 2009. Documento Básico HE Ahorro de energía.
- Goodwin, P., Dargay, J., Hanly, M., 2004. Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: a review. *Transp. Rev.* 24, 275–292. doi:10.1080/0144164042000181725
- Govern d'Andorra, 2015. Programa Renova. Millora de l'eficiència energètica en edificis existents. URL: <http://www.mediambient.ad/millora-de-l-eficiencia-energetica-en-edificis-existents> (accessed 10.13.15).
- Govern d'Andorra, 2012a. Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra.
- Govern d'Andorra, 2012b. Reglament de la certificació energètica en l'edificació.
- Govern d'Andorra, 2010. Reglament energètic en l'edificació.
- Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., Sorenson, S., 1999. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. *Transp. Res. Board.*
- IDAE, 2011. Análisis del consumo energético del sector residencial en España.
- IEA, 2015. World Energy Outlook 2015. Paris.
- IEA, 2011. 4E Benchmarking Energy Efficiency of New Air Conditioners.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Jong, G. De, Schrotten, A., Essen, H. Van, 2010. Price sensitivity of European road freight transport - towards a better understanding of existing results.
- Lapillonne, B., Pollier, K., Samci, N., 2015. Energy Efficiency Trends for households in the EU. Enerdata.
- Litman, T., 2013. Understanding transport demands and elasticities. How prices and other factors affect travel behavior.
- Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2007. Documento de condiciones de aceptación de Programas Informáticos Alternativos.
- Miquel, C., Armengol, J.-L., Dobarro, J., Natàlia, R., 2014. Premier rapport bisannuel de l'Andorre a la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Govern d'Andorra, Andorra la Vella.
- OBSA, 2014. Estimació de les accions a realitzar en eficiència energètica en l'àmbit dels edificis públics.
- OCCC, 2016. Nota informativa sobre la metodologia del mix elèctric por parte de la Oficina Catalana del Cambio Climático.
- OECD/IEA, 2016. Global EV Outlook 2016. Beyond one million electric cars. Paris, France.

- Outeda, P., Martinelli, G., Hernández, A., 2009. Consumos de energía y emisiones asociados al transporte por autobús y autocar.
- Pasaoglu, G., Honselaar, M., Thiel, C., 2012. Potential vehicle fleet CO2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe. *Energy Policy* 40, 404–421. doi:10.1016/j.enpol.2011.10.025
- Pons-Pons, M., Johnson, P. a., Rosas-Casals, M., Sureda, B., Jover, E., 2011. A georeferenced Agent-Based Model to analyze the climate change impacts on the Andorra winter tourism 24. doi:10.1080/13658816.2014.933481
- Rogan, F., Cahill, C.J., Daly, H.E., Dineen, D., Deane, J.P., Heaps, C., Welsch, M., Howells, M., Bazilian, M., Ó Gallachóir, B.P., 2013. LEAPs and Bounds—an Energy Demand and Constraint Optimised Model of the Irish Energy System. *Energy Effic.* 7, 441–466. doi:10.1007/s12053-013-9231-9
- Rte, 2016. Le réseau de l'intelligence électrique. Key Figures. URL: <http://www.rte-france.com/en/eco2mix/chiffres-cles-en> (accessed 6.7.16).
- Rubinger, R.M., da Silva, E.R., Pinto, D.Z., Rubinger, C.P.L., Oliveira, A.F., da Costa Bortoni, E., 2015. Comparative and quantitative analysis of white light-emitting diodes and other lamps used for home illumination. *Opt. Eng.* 54, 14104. doi:10.1117/1.OE.54.1.014104
- Simoes, S., Nijs, W., Ruiz, P., Sgobbi, A., Radu, D., Bolat, P., Thiel, C., Peteves, S., 2013. The JRC-EU-TIMES model. Assessing the long-term role of the SET Plan Energy technologies. Luxembourg. doi:10.2790/97596
- Travesset-Baro, O., Gallachóir, B.P.Ó., Jover, E., Rosas-Casals, M., 2016. Transport energy demand in Andorra. Assessing private car futures through sensitivity and scenario analysis. *Energy Policy* 96, 78–92. doi:10.1016/j.enpol.2016.05.041
- Travesset-Baro, O., Rosas-Casals, M., Jover, E., 2015. Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 34, 16–26. doi:10.1016/j.trd.2014.09.006
- Ubeda, S., Arcelus, F.J., Faulin, J., 2011. Green logistics at Eroski: A case study. *Int. J. Prod. Econ.* 131, 44–51. doi:10.1016/j.ijpe.2010.04.041
- Van den Brink, R.M., Van Wee, B., 2001. Why has car-fleet specific fuel consumption not shown any decrease since 1990? Quantitative analysis of Dutch passenger car-fleet specific fuel consumption. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 6, 75–93. doi:10.1016/S1361-9209(00)00014-6

VCA, 2016. Car fuel data, CO2 and vehicle tax tools. URL: <http://carfueldata.direct.gov.uk/>
(accessed 4.10.16).

3

MODELITZACIÓ DE L'ABASTIMENT D'ENERGIA

El Capítol 3 detalla la construcció del mòdul d'abastiment d'energia del model LEAP-Andorra. Degut a les característiques del sector energètic andorrà, bona part d'aquest capítol està dedicat a la modelització del sector elèctric. Partint dels escenaris resultants del capítol anterior, es construeixen un conjunt d'escenaris per tal d'explorar els impactes de diferents alternatives d'abastiment d'energia.

3.1 Introducció

LEAP modelitza l'abastiment d'energia mitjançant el mòdul anomenat *Transformation*. En el seu interior es simula la conversió i transport de les diferents formes d'energia des del seu origen fins als punts de consum. Alhora, aquest està format per mòduls que representen els diferents sectors encarregats del subministrament i conversió d'energia tals com la generació i distribució elèctrica, el refinat del petroli o la producció de carbó vegetal. Cadascun dels mòduls conté diferents processos, representant tecnologies individuals de producció o distribució (p.ex. centrals de generació elèctrica, xarxa de distribució d'electricitat) d'una o més fonts d'energia. Tal com es mostra en la Fig. 3.1, els processos poden utilitzar més d'una font d'energia d'entrada, a més de fonts auxiliars, representant l'energia complementària consumida en el propi procés (p.ex. l'electricitat en la refinaria de petroli). Per cada procés es detallen de forma individual les característiques tècniques com la capacitat, l'eficiència, la disponibilitat o els costos de capital, operació i manteniment. L'energia final proporcionada pels diferents mòduls ve determinada per les seves característiques i pels requeriments del mòdul de demanda. En cas d'incapacitat dels processos del propi sistema de generar l'energia sol·licitada pel mòdul de demanda, el dèficit pot ser cobert mitjançant importacions si així se li defineix al sistema.

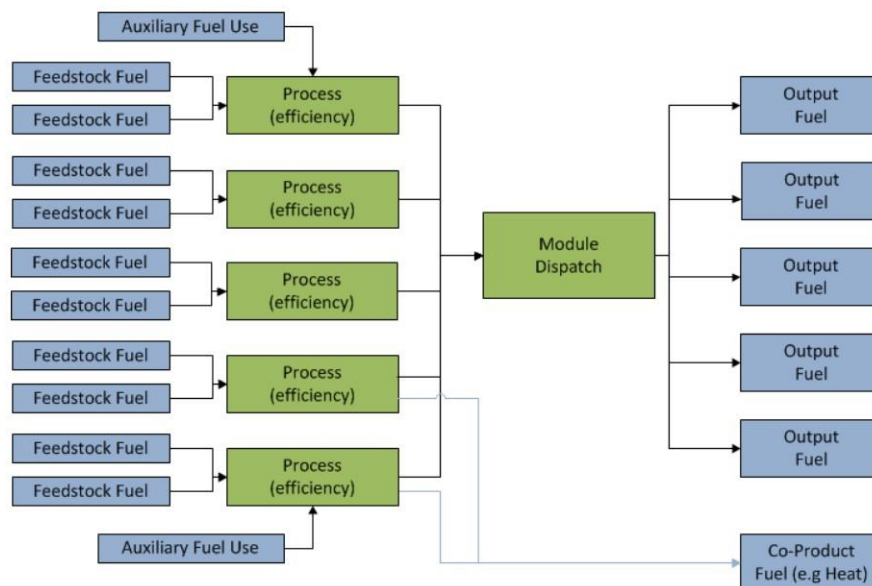


Fig. 3.1. Estructura general d'un mòdul d'abastiment d'energia en LEAP. Font: SEI (2016)

En el cas d'Andorra, menys del 20% de l'electricitat es generada actualment de forma autòctona a través de la central hidroelèctrica d'Escaldes i del Centre de Tractament de Residus (CTR) d'Andorra la Vella (FEDA, 2016a). La resta és importada de França i Espanya aproximadament a parts iguals, així com les altres fonts secundàries d'energia que conformen el mix energètic del país (gas butà/propà, gasoil, gasolina i fuel domèstic²³). Andorra, a diferència de la major part de països europeus, no importa fonts d'energia primàries (p.ex. petroli) ja que no disposa d'infraestructura per tal de transformar-la. En aquest sentit, l'abastiment d'energia en el model LEAP-Andorra es representa únicament mitjançant els mòduls encarregats de caracteritzar el sector elèctric. La resta d'energies secundàries s'importen en funció de l'energia sol·licitada pel mòdul de demanda.

3.2 Abastiment d'energia elèctrica

La modelització de l'abastiment elèctric del model LEAP-Andorra es realitza mitjançant dos mòduls principals: (1) Distribució elèctrica, representant les pèrdues en aquest procés i (2) Generació elèctrica. Aquest últim, representat en la Fig. 3.2, contempla tant les tecnologies presents en el sector elèctric actual com les potencials d'introduir-se en un futur. A diferència del que és habitual en LEAP, les importacions d'electricitat s'inclouen com a

²³ A Andorra, el fuel domèstic (gasoil de calefacció) coincideix amb el gasoil de locomoció, per tant, presenta les mateixes característiques que aquest

processos del mòdul de generació elèctrica, permetent així caracteritzar-les en detall i copsar les diferències existents entre l'electricitat importada d'Espanya i França (p.ex. diferències en costos, capacitats d'importació, factor d'emissions, etc.).

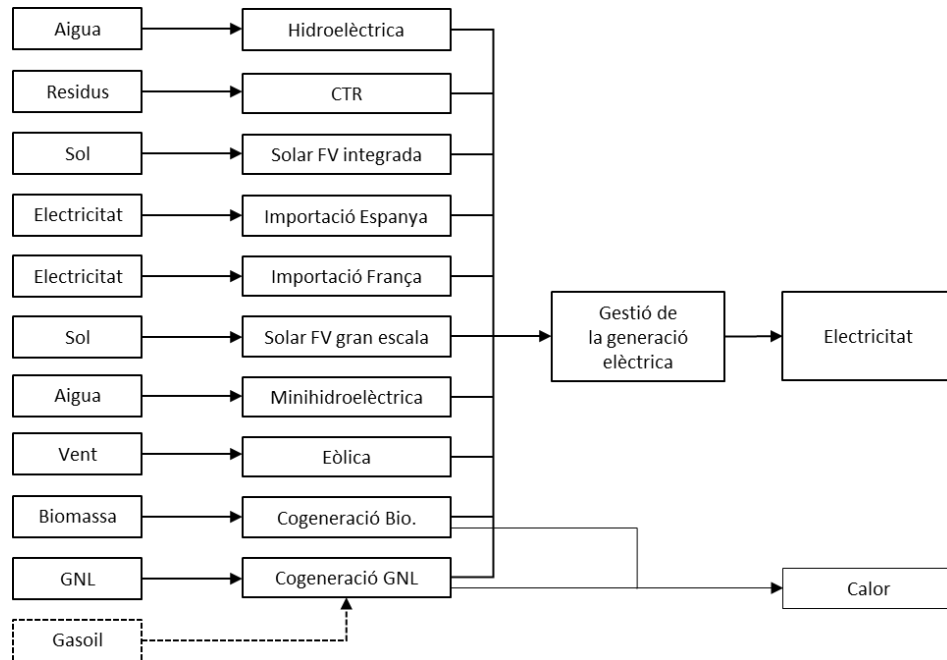


Fig. 3.2. Diagrama d'abastiment elèctric del mòdul LEAP-Andorra

Tot i que la major part dels càlculs en LEAP es realitzen amb un interval temporal d'un any, en els referents al sector elèctric és possible incrementar el detall fins a resolució horària. Val a dir que, a mesura que s'incrementa la resolució, augmenta considerablement el temps de simulació. En aquest sentit, el model LEAP-Andorra treballa a escala mensual permetent així captar la variabilitat en la demanda elèctrica i la disponibilitat de recursos per a la generació (p.ex. variació estacional del cabal d'aigua o la irradiació solar). L'escala mensual s'ha considerat la més adequada tenint en consideració la disponibilitat de dades actuals i el temps de càlcul del model.

LEAP ofereix diferents opcions de gestió de la generació elèctrica com fixar l'aportació de cada tecnologia, prioritzar-ne unes respecte altres o utilitzar les de menor cost en cada interval de temps. A excepció dels escenaris d'optimització de menor cost, LEAP-Andorra utilitza el criteri *Running Cost*. Aquest, prioritza les tecnologies amb un menor cost de funcionament (definit com la suma del cost d'operació i manteniment i el combustible) entre totes les disponibles en cada interval temporal.

3.2.1 Transport i distribució elèctrica

La importació i el transport intern de l'electricitat a Andorra es duen a terme a través d'una xarxa de transport d'alta tensió de 56,3 km dels quals el 31,8% estan soterrats. Afegint-hi la longitud de les línies de baixa i mitjana tensió, la xarxa elèctrica de FEDA assoleix gairebé els 700 km de cable, dels quals el 84% són línies soterrades (FEDA, 2016b). Tal com es mostra en la Fig. 3.3, el transport i la distribució elèctrica es caracteritzen en LEAP mitjançant un mòdul simple situat entre la generació i la demanda d'electricitat en el qual s'apliquen pèrdues degudes a l'efecte Joule. Les pèrdues de transmissió i distribució considerades (5,05%) es basen en les publicades en la memòria de Responsabilitat Social Corporativa de FEDA relatives a l'any 2013 (FEDA, 2014).

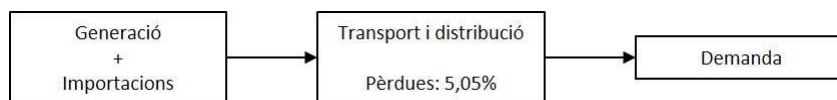


Fig. 3.3. Flux de l'electricitat en el model LEAP-Andorra des del mòdul de generació fins al mòdul de demanda

L'escala temporal en la que treballa el model requereix la definició de la corba de consum elèctric mensual. Aquesta l'utilitza LEAP internament per tal de distribuir el consum elèctric al llarg de l'any i gestionar la generació elèctrica mes a mes. La Fig. 3.4 mostra la corba de consum elèctric mensual construïda a partir de la corba de consum horària de l'any 2014²⁴.

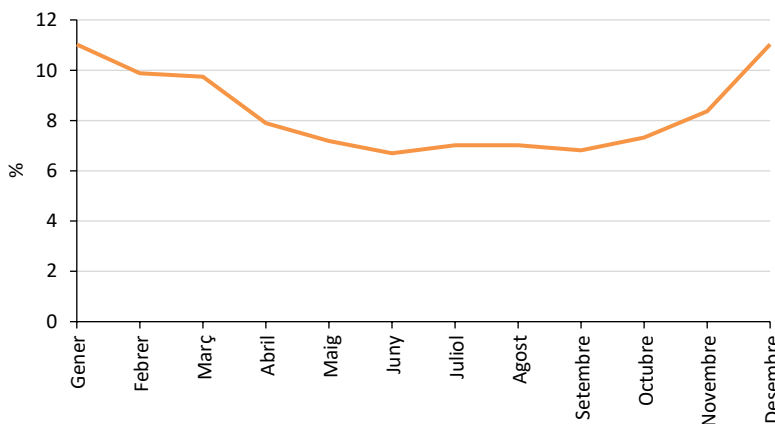


Fig. 3.4. Corba de consum elèctric mensual (en % anual)

²⁴ Comunicació personal FEDA

3.2.2 Generació elèctrica actual

L'any 2015, únicament el 17% de l'electricitat consumida a Andorra ha estat generada de forma autòctona. L'alta dependència de les importacions ha estat una constant en els últims anys, apreciant-se únicament petites fluctuacions provocades per la variabilitat de la generació d'energia hidroelèctrica. La Fig. 3.5 mostra les dos principals infraestructures de generació elèctrica del país, juntament amb les línies d'importació d'electricitat de França i Espanya.



Fig. 3.5. Origen de l'electricitat consumida a Andorra l'any 2015. Font: FEDA (2016a)

A la central hidroelèctrica i al CTR cal afegir-hi la petita contribució de l'energia solar fotovoltaica integrada en edificis que amb 342 kWp instal·lats ha aportat 250 MWh a la xarxa l'any 2015²⁵.

A continuació es detallen les característiques tècniques i els costos utilitzats en la modelització de cada una de les tecnologies actuals i futures de generació elèctrica del sistema energètic d'Andorra.

²⁵ Comunicació personal OECC

3.2.2.1 Hidroelèctrica

La central hidroelèctrica ubicada a Encamp té una potència instal·lada de 47 MVA, constituïda per dos grups de 15 MVA i un tercer de 17 MVA que va entrar en funcionament l'any 2008. Aquesta, data de 1934 i fou construïda per Forces Hidroelèctriques d'Andorra (FHASA), que a canvi d'explotar el recurs hídic va encarregar-se de desplegar bona part de la xarxa viària del país. La cambra de càrrega, amb una capacitat de 600000 m³, es troba a la presa d'Engolasters i es alimentada per l'aigua provinent de les preses de Ràmio i Ransol. Existeixen també instal·lacions per emmagatzemar reserves d'aigua en diferents estanys com el de l'Illa, Cabana Sorda o Juclar.

Com es pot observar en la Fig. 3.6, els mesos de primavera són els de major producció gràcies a l'increment del recurs hídic provocat pel desgel. Per tal de caracteritzar la disponibilitat màxima d'aquest procés en LEAP, s'utilitza la mitjana del factor de capacitat (FC) mensual pel període 2010-2015.

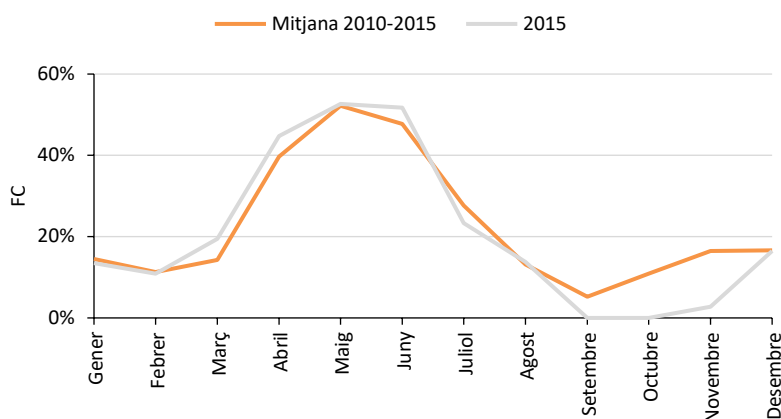


Fig. 3.6. FC mensual de la central hidroelèctrica (mitjana 2010-2015 i valor 2015). Font: FEDA (2016a)

Les característiques tècniques, costos i vida útil de la central hidroelèctrica es detallen en la Taula 3.1. Els valors assumits com a cost d'inversió i vida útil de la instal·lació es basen en IEA/NEA (2015). En aquest cas, IRENA (2015) serveix com a base per establir els costos d'operació i manteniment (O&M).

3.2.2.2 Centre de Tractament de Residus

El CTR està format per una unitat d'incineració de residus amb valorització energètica de 5 MVA, una deixalleria i una planta de transferència i emmagatzematge de residus valoritzables. L'any 2015 va generar 13,8 GWh, tot i que per les seves característiques podria arribar als 33 GWh anuals (FEDA, 2016a). Des que va entrar en funcionament l'any 2006, la

seva producció anual ha oscil·lat entre els 12 i 19 GWh amb una variabilitat mensual influenciada principalment pel turisme (veure Fig. 3.7). Malgrat la previsió que en els propers anys hi hagi un augment progressiu de la població i el nombre de visitants, la generació de residus a valoritzar energèticament s'espera que s'estabilitzi gràcies a la millora en la recollida selectiva. Per aquest motiu, d'igual manera que en la hidroelèctrica, la disponibilitat mensual màxima del CTR s'estableix d'acord amb la mitjana del FC pel període 2010-2015.

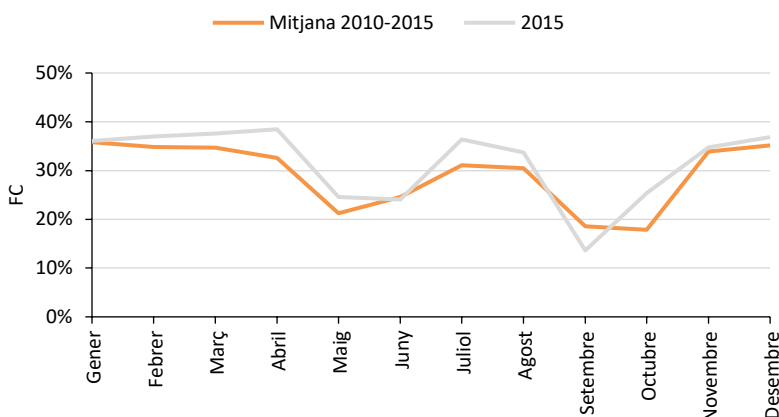


Fig. 3.7. FC mensual del CTR (mitjana 2010-2015 i valor 2015). Font: FEDA (2016a)

En la Taula 3.1 es detallen les característiques tècniques i costos (IEA/NEA, 2015; IRENA, 2015) relatius al CTR utilitzats en el model.

3.2.2.3 Energia solar fotovoltaica

La Llei 85/2010, elimina el règim d'exclusiva atribuït a l'Administració en matèria de producció d'energia elèctrica i permet la instal·lació de panells solars fotovoltaics per potències inferiors a 500 kW, amb possibilitat de cedir a la xarxa la seva producció. També habilita el Govern a regular reglamentàriament l'activitat de producció d'energia elèctrica mitjançant tecnologia solar fotovoltaica, així com el procediment per a la posada en marxa i el control d'aquestes instal·lacions.

El Reglament de regulació de l'activitat de generació d'energia elèctrica d'origen fotovoltaic en instal·lacions integrades en edificacions i interconnectades a la xarxa de baixa tensió estableix les prescripcions tècniques i administratives que regulen la producció d'electricitat en instal·lacions que estiguin incorporades en tancaments o cobertes d'edificacions. Així mateix, el Decret del 13-03-2013 preveu la publicació periòdica de convocatòries per a la inscripció de les instal·lacions al Registre d'Instal·lacions

Fotovoltaïques, amb indicació de la quota de potència i de la tarifa de compra (esquema *feed-in tariff*²⁶).

A la pràctica, l'energia solar fotovoltaica es comença a desplegar a Andorra a partir de l'any 2013. Actualment es disposa d'una potència instal·lada de 342 kWp amb la que es van generar 250 MWh l'any 2015. Aquestes dades porten a un FC anual proper al 8%, valor molt baix degut a que bona part de les instal·lacions s'han posat en funcionament ben entrat l'any 2015. La corba de disponibilitat mensual s'estableix en LEAP basant-se en la mitjana de producció mensual de les instal·lacions fotovoltaïques d'Andorra de les quals es disposen de dades completes per l'any 2015 (11 instal·lacions)²⁷.

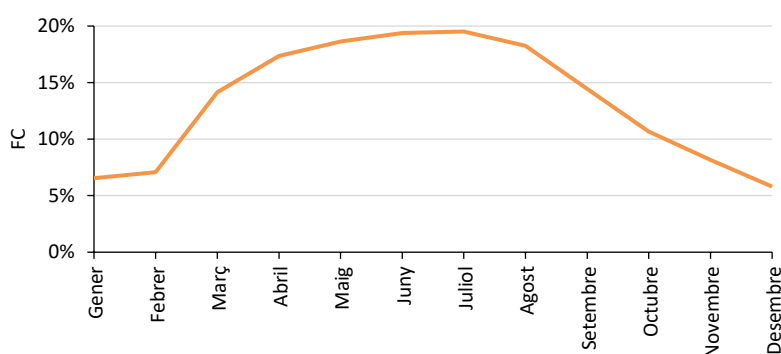


Fig. 3.8. FC mensual de l'energia solar fotovoltaica

La Taula 3.1 detalla les característiques tècniques, costos i vida útil dels projectes amb tecnologia fotovoltaica a Andorra. En aquest cas, els valors considerats es basen íntegrament en IEA/NEA (2015).

3.2.3 Importacions

L'any 2015, el 83% de la demanda d'electricitat d'Andorra va ser coberta mitjançant importacions. El 55% d'aquestes provenia d'Espanya i la resta de França, valors que han sofert poques variacions en els darrers deu anys. La compra d'electricitat a un país o l'altre es decideix generalment en funció del preu de venda de l'energia. La tendència històrica ha estat importar més electricitat d'Espanya durant l'hivern i inicis de primavera i potenciar les importacions de França durant els mesos d'estiu quan l'electricitat provinent de la península acostuma a ser més cara. Disposar de dues línies d'importació independents

²⁶ Veure <http://www.mediambient.ad/energia/generacio-d-energia-electrica-d-origen-fotovoltaic> per més detall

²⁷ Comunicació personal OECC

permet garantir la qualitat en el subministrament donant opció a prescindir d'una d'elles en cas de fallada o realització de tasques de manteniment.

Les línies d'importació es caracteritzen en el LEAP-Andorra mitjançant la seva capacitat (125 MW i 225 MW per la línia espanyola i francesa respectivament) i la disponibilitat anual (considerada del 85% en ambdós casos). Les línies d'importació modelitzades són vistes per LEAP com dues tecnologies addicionals disponibles en el mòdul d'abastiment, les quals aportaran electricitat al sistema en funció dels criteris definits en cada escenari.

3.2.4 Noves tecnologies de generació elèctrica

La reducció de la dependència energètica, juntament amb el risc de saturació de les línies d'importació i els compromisos mediambientals obliguen a Andorra a apostar per la introducció de tecnologies de generació elèctrica que actualment no estan presents en el sistema. En aquest sentit, el Llibre Blanc de l'Energia (Govern d'Andorra, 2012) identifica el foment de les energies renovables i l'aposta per la cogeneració amb gas natural liquat (GNL) i biomassa com a eixos prioritaris en aquesta línia.

A continuació es descriu la caracterització en el model LEAP de les tecnologies potencials d'entrar a formar part de sistema energètic andorrà. Els potencials de generació elèctrica de les diverses fonts provenen d'estimacions de l'OECC basades en estudis no públics.

3.2.4.1 Solar fotovoltaica a gran escala

Actualment, la legislació andorrana únicament permet l'ús de la tecnologia fotovoltaica en instal·lacions incorporades en edificacions. De totes maneres, l'administració considera la possibilitat a mitjà termini de reglamentar i facilitar la creació de camps solars (Govern d'Andorra, 2012). Per aquest motiu s'inclou en el model com a tecnologia potencial de formar part del sistema energètic a mitjà i llarg termini.

Les característiques considerades en el model LEAP-Andorra fan referència a projectes fotovoltaics sense seguidors. El potencial de generació d'aquesta tecnologia s'estima en uns 200 GWh anuals. La disponibilitat considerada es basa en el FC conegut de les instal·lacions fotovoltaiques existents en edificacions més un factor d'increment d'1,15 (IEA/NEA, 2015) per copsar la major radiació dels futurs camps solars degut a l'absència d'edificis.

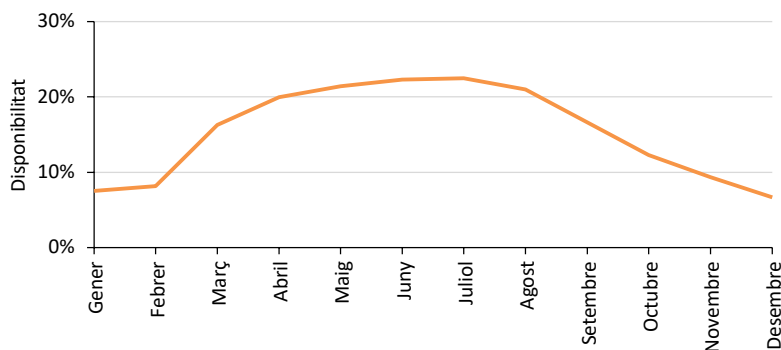


Fig. 3.9. Disponibilitat mensual estimada de l'energia solar fotovoltaica a gran escala

En aquest cas, tal com es pot observar en la Taula 3.1, els costos assumits són equivalents a la tecnologia solar fotovoltaica a petita escala.

3.2.4.2 Minihidroelèctrica

L'actual central hidroelèctrica d'Escaldes aprofita la pràctica totalitat dels recursos hídrics del riu Valira d'Orient i Madriu. En les valls no explotades, essencialment Valira del Nord i Gran Valira, la major part dels aprofitaments haurien de ser d'aigua fluent i amb potències inferiors als 10 MW, ja que no ofereixen la possibilitat de disposar d'emmagatzematge degut a les seves característiques.

El sostre de generació anual mitjançant centrals de petita potència es situa al voltant dels 120 GWh. La disponibilitat d'aquest procés en LEAP (veure Fig. 3.10) s'ha estimat a partir de la corba característica de cabals.

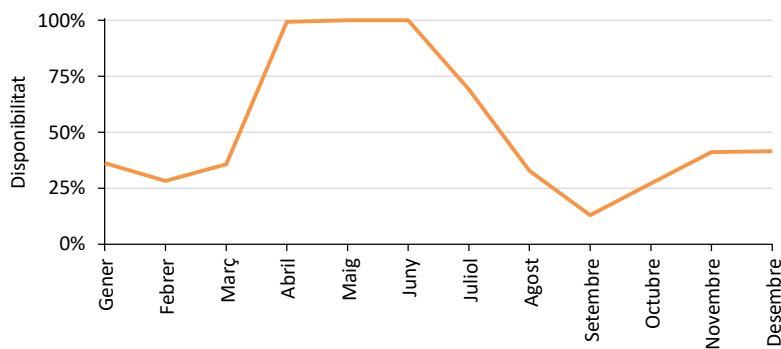


Fig. 3.10. Disponibilitat mensual estimada de l'energia generada a partir de centrals de petita potència. Font: OECC (2016)

Pel fet de tractar-se de centrals de petita potència, els costos associats a aquesta tecnologia són sensiblement superiors a les de les centrals hidroelèctriques convencionals. Els valors

assumits com a cost d'inversió i vida útil de la instal·lació es basen en IEA/NEA (2015) i els costos d'O&M en IRENA (2015) (veure Taula 3.1).

3.2.4.3 Eòlica

Malgrat que a nivell internacional l'energia eòlica ha estat la tecnologia amb un major creixement en els darrers anys, en el cas d'Andorra existeixen diversos aspectes que en dificulten la seva implantació. El principal escull per a la instal·lació d'aerogeneradors és que les zones de major recurs eòlic són de difícil accés degut a la topografia andorrana, incrementant-ne de forma considerable els costos d'instal·lació i d'O&M. D'altra banda, les condicions climàtiques extremes faciliten la formació de gel durant alguns mesos, amb el consegüent risc en cas de ser instal·lacions properes a espais freqüentats en temporada d'hivern. Degut a les limitacions d'accés a zones amb bon recurs eòlic, la potència unitària dels aerogeneradors que es podrien instal·lar aniria entre els 300 kW i els 800 kW (Govern d'Andorra, 2012).

El potencial màxim de generació elèctrica d'aquest recurs s'estima en 200 GWh anuals. No es disposa de dades sobre factors de capacitat mensuals de futurs parcs eòlics a Andorra pel que s'assumeix un valor anual del 31%²⁸. Els costos considerats en el model (veure Taula 3.1) es basen en IEA/NEA (2015). En aquest cas, seria especialment interessant disposar de costos adaptats al territori andorrà, segurament més alts que els considerats degut a la incidència derivada de la potència unitària relativament baixa dels aerogeneradors i al sobrecost per la dificultat dels accessos.

3.2.4.4 Cogeneració

L'any 2008, FEDA va iniciar el projecte d'una central de cogeneració utilitzant GNL, ubicada al poble de Soldeu. Aquest és el tret de sortida de l'aposta d'Andorra per la cogeneració, confirmat a posteriori l'any 2012 en el Llibre Blanc de l'Energia com una de les línies estratègiques en el futur sistema energètic nacional. Actualment la planta de cogeneració de Soldeu ja és una realitat i després de la seva entrada en funcionament l'hivern 2016-2017, aporta calor a través d'una xarxa de calefacció urbana, a més d'electricitat. En aquesta mateixa línia, existeix la possibilitat de construir diverses plantes similars en altres llocs del país (10 en total) repartides per totes les parròquies i que podrien subministrar calor en zones urbanes (Govern d'Andorra, 2012). No disposar d'un gasoducte

²⁸ Valor derivat del Llibre Blanc de l'Energia tenint en compte els valors de potència instal·lable i generació elèctrica anual estimada

representa un handicap important ja que obliga a importar el GNL mitjançant camions que circularan fins als dipòsits d'emmagatzematge i regasificació.

A més dels projectes de cogeneració amb GNL també es preveu la possible construcció de petites plantes de cogeneració utilitzant biomassa com a combustible.

Les característiques tècniques i els costos de les futures centrals de cogeneració es detallen en la Taula 3.1. Els costos dels hipotètics projectes es basen en IEA/NEA (2015), a excepció dels costos d'inversió de les centrals amb GNL que es deriven del projecte de Soldeu (Badia Llimós, 2012).

Tecnologia	Capacitat ^a (MW)	Eficiència (%)	Disponib. (%)	Vida útil (anys)	Costos d'inversió (M\$/MW)	Costos O&M fix (\$/MW)	Costos O&M variable (\$/MWh)
Hidroelèctrica	47	100	22,5 ^b	80	1,195	30000	6
CTR	5	30	29,2 ^b	30	5,800	48172	4
Solar FV petita escala	0,342	100	13,4 ^b	25	2,297	28333	0
Nova hidroelèctrica	0	100	52,1 ^b	80	2,588	50000	6
Eòlica	0	100	31	25	1,804	45475	5,9
Nova solar FV petita escala	0	100	13,4 ^b	25	2,297	28333	0
Solar FV gran escala	0	100	15,4 ^b	25	1,436	26667	0
CHP Biomassa	0	45/30 ^c	85	30	5,333	48172	4
CHP GNL	0	45/30 ^c	85	30	4,814	48172	4,3

Taula 3.1. Paràmetres considerats en la modelització de la generació elèctrica (^aValor relatiu a l'any base,

^bValor mig anual: paràmetre introduït a escala mensual, ^cElectricitat/calor)

3.3 Recursos energètics

L'últim pas en la modelització d'un sistema energètic en LEAP consisteix en establir quins dels recursos energètics utilitzats en el model són autòctons i quins importats. Dels recursos primaris cal definir-ne les reserves totals en l'any base del model, en cas de tractar-se de recursos fòssils, o el potencial màxim anual quan es tracta de recursos renovables. Aquest s'ha considerat il·limitat en els casos del Sol, Vent, Aigua i Residus ja que la generació amb aquests recursos ja queda limitada per la potència màxima instal·lable de cada tecnologia (detallat en la Secció 3.4.4). En el cas de la biomassa, d'acord amb les estimacions realitzades en el Llibre Blanc de l'Energia, s'estableix un aprofitament energètic màxim de 60 GWh/any (Govern d'Andorra, 2012).

Tots els recursos secundaris en el model LEAP-Andorra són importats, a excepció de l'electricitat generada de forma autòctona. La Fig. 3.11 mostra els recursos utilitzats en el model, classificats segons primaris o secundaris.

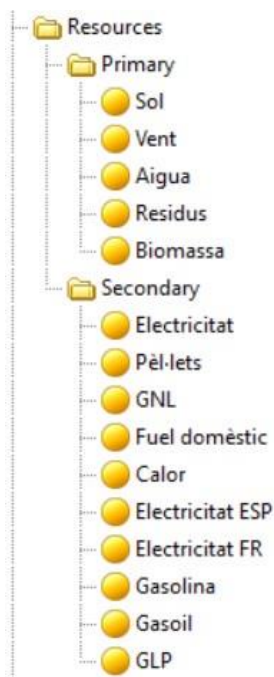


Fig. 3.11. Estructura d'arbre del model LEAP-Andorra representant els recursos primaris i secundaris

El preu dels recursos és un factor determinant en la definició de les polítiques energètiques més adequades per un país. En aquest sentit, la problemàtica principal resideix en la dificultat de disposar de projeccions de preus acurades a llarg termini en un àmbit en que els nivells d'incertesa són molt elevats.

Els preus del gasoil, la gasolina, el fuel domèstic i els gasos liquats del petroli (GLP) en l'any base del model, fan referència als observats a Espanya sense tenir en compte les taxes (European Commission, 2016a). La seva evolució futura està lligada al preu del petroli, motiu pel qual s'assumeix el mateix rati de creixement fins l'any 2050. Tal com s'observa en la Fig. 3.12, el GNL parteix d'un preu més baix, valor basat en els mercats espanyol i francès l'any 2015 (European Commission, 2016b) i la seva evolució futura parteix de les projeccions més recents publicades per la Comissió Europea (Capros et al., 2013).

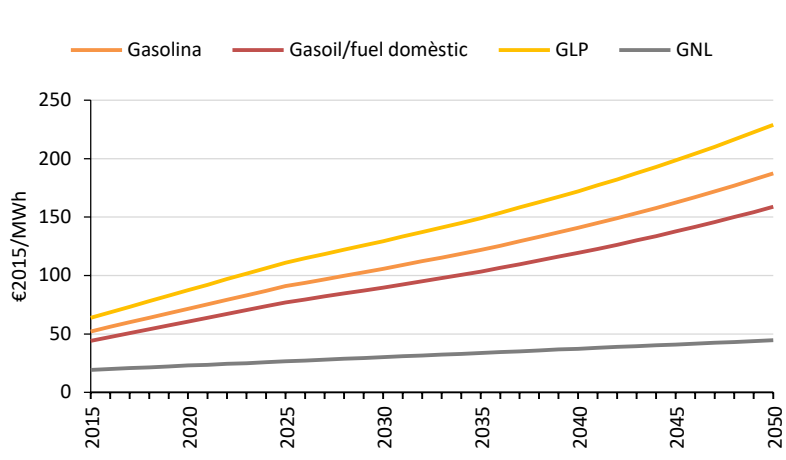


Fig. 3.12. Cost d'importació dels combustibles fòssils en el model LEAP-Andorra

Tenint en compte els preus mitjans mensuals del mercat de generació d'energia elèctrica durant l'any 2015 (OMIE, 2015) s'estableix un valor en l'any base del model de 50 €/MWh tant per l'electricitat importada d'Espanya com de França. Degut a la inexistència d'informes consistents amb estimacions de l'evolució del preu de l'electricitat en els països veïns, s'assumeix un 3% d'increment anual fins l'any 2050 en ambdós casos.

El model considera que la totalitat de pèl·lets consumits són importats ja que en l'actualitat no se'n produeixen a Andorra. El cost d'importació d'aquest combustible es basa en el preu del palet de pèl·let a Espanya abans d'impostos (44,7 €/MWh). D'acord amb l'evolució de preus observada des de l'any 2012, es considera que aquest es mantindrà constant en un futur (AVEBIOM, 2016).

3.4 Escenaris de futur

A continuació es detallen els escenaris de futur considerats en l'àmbit de l'abastiment energètic i particularment centrats en la generació elèctrica. En primera instància es presenta l'escenari de referència el qual serveix com a base per a la comparativa amb els escenaris alternatius. Seguidament es presenta l'escenari Llibre Blanc i dos escenaris d'optimització. Degut a que en l'àmbit de la demanda d'electricitat, l'escenari de referència i l'escenari Eficient (veure Secció 2.7.3) segueixen una evolució molt similar (1,5% d'estalvi l'any 2050 respecte el Referència), en aquest document únicament es mostren els escenaris alternatius simulats a partir dels resultats de demanda de l'escenari Eficient. D'aquesta manera s'evita la generació d'excessius escenaris amb resultats gairebé equivalents.

En línia amb els informes més recents publicats per l'Agència Internacional de l'Energia, el model estableix en tots els escenaris un preu d'emissions constant de 30 US\$/tCO₂ (IEA/NEA, 2015).

LEAP realitza l'actualització dels costos mitjançant el mètode *Capital Recovery Factor*, a partir dels costos de capital, la vida útil de la instal·lació (o del préstec), i el rati d'interès del préstec. El rati d'interès s'estableix a un 5%, igual que el rati de descompte utilitzat per l'actualització futura dels costos²⁹.

3.4.1 Escenari de referència

L'escenari de referència considera que l'abastiment d'electricitat seguirà la tendència dels últims anys. Es mantindran les infraestructures actuals fins l'any 2050 i no s'afegirà nova capacitat de generació ni importació a banda de l'ampliació de la interconnexió amb França que ha entrat en servei l'any 2016. Les importacions segueixen dominant el sistema energètic i es mantenen els ratis d'importació dels països veïns (55% d'Espanya, 45% de França). La gestió de la generació prioritza les tecnologies amb un menor cost d'O&M i combustible d'entre les disponibles en cada interval temporal (criteri *Running Cost* en LEAP).

3.4.2 Escenari Eficient

Els criteris de generació elèctrica establerts en aquest escenari són els mateixos que en l'escenari de referència. Com es comenta prèviament, tot i introduir importants mesures d'estalvi energètic, la demanda d'electricitat l'any 2050 és únicament un 1,5% inferior a la de l'escenari Referència. Aquest fet és deu a que l'aposta per la mobilitat elèctrica incrementa el consum d'electricitat del sector del transport i compensa els estalvis assolits en els altres sectors.

La demanda d'energia d'aquest escenari s'estableix com a referència en la implementació de la resta d'escenaris alternatius descrits a continuació.

3.4.3 Escenari Llibre Blanc

L'escenari Llibre Blanc preveu la incorporació d'altres fonts energètiques com la cogeneració i les energies renovables per tal de potenciar la generació autòctona i diversificar les fonts d'energia del país. La capacitat de generació elèctrica en aquest escenari

²⁹ Per disseny, quan LEAP treballa en mode d'optimització, els valors del rati d'interès de cada tecnologia i el rati de descompte són iguals

s'ha establert de forma exògena d'acord al Llibre Blanc de l'Energia (Govern d'Andorra, 2012) i a previsions aportades per FEDA basades en estudis propis. A expenses que es publiqui el Pla sectorial d'infraestructures energètiques a mitjans de l'any 2017, aquest representa l'escenari oficial en l'àmbit de l'abastiment elèctric nacional.

Tal com es mostra en la Taula 3.2, aquest escenari preveu un creixement continuat de la producció elèctrica autòctona fins l'any 2040, data en que s'atura la incorporació de nova capacitat de generació.

Tecnologia	2020	2030	2040	2050
Nova Hidroelèctrica	23,7	23,7	23,7	23,7
Eòlica	-	13,0	13,0	13,0
Nova Solar FV petita escala	3,4	10,2	15,4	12,0
CHP Biomassa	3,0	3,0	3,0	0,0
CHP GNL	15,0	30,0	47,0	32,0

Taula 3.2. Potència instal·lada (MW) de les futures tecnologies de generació elèctrica en l'escenari Llibre Blanc

Com es pot observar en la Taula 3.2, les tecnologies solar FV petita escala, CHP biomassa i CHP GNL sofreixen un disminució de potència instal·lada l'any 2050 equivalent a la instal·lada l'any 2020 per representar l'arribada d'aquestes centrals al final del seu cicle de vida útil (Taula 3.1). Quan la capacitat instal·lada es defineix de forma exògena com en aquest escenari, LEAP no té en compte la vida útil establerta de la instal·lació i per tant és necessari retirar la capacitat de forma manual. Per contra, si que considera la vida útil en els càlculs financers. Realitzant la retirada de forma manual, s'evita que existeixi disparitat entre la vida útil física de la instal·lació i la considerada en els càlculs financers i prevenir així resultats erronis en els càlculs dels costos de generació.

D'igual manera que en l'escenari Referència, la gestió de la generació elèctrica es realitza amb el criteri *Running Cost*.

3.4.4 Escenari Òptim

A diferència dels escenaris anteriors, l'escenari Òptim no estableix la introducció de nova capacitat de generació de forma exògena sinó que és el propi model qui l'afegeix en funció d'una sèrie de paràmetres fixats prèviament. LEAP, mitjançant el mòdul d'optimització lineal OSeMOSYS (Howells et al., 2011), calcula l'expansió de capacitat òptima de mínim cost durant tot el període temporal. En el càlcul del sistema òptim, el model té en compte tots els costos rellevants dels nous processos a incorporar: costos de capital, costos d'O&M fixes i variables, costos de combustible i externalitats mediambientals (p.ex. emissions de CO₂). LEAP-Andorra incorpora límits en la capacitat instal·lable de cada una de les

tecnologies disponibles. Aquests valors, presentats a la Taula 3.3, es basen en estimacions realitzades per l'OECC³⁰ tenint en compte la disponibilitat de recursos autòctons i criteris ambientals.

Tecnologia	Capacitat màxima instal·lable (MW)
Nova Hidroelèctrica	23,70
Eòlica	73,65
Nova Solar FV petita escala	15,40
Solar FV gran escala	117,16
CHP Biomassa	3,00
CHP GNL	47,00

Taula 3.3. Capacitats màximes instal·lables de les tecnologies disponibles en el model LEAP-Andorra

3.4.5 Escenari Òptim amb límit de CO₂

Aquest escenari és equivalent a l'escenari Òptim però inclou un límit d'emissions de CO₂ que el conjunt del sistema energètic no pot superar. La primera restricció establerta (277151 tCO₂) es basa en el compromís d'Andorra de reduir en un 37% les emissions de GEH l'any 2030 respecte l'escenari de referència (Govern d'Andorra, 2015). Addicionalment als compromisos oficials, s'estableix un límit l'any 2050 (250872 tCO₂) corresponent al 50% de reducció respecte l'escenari Referència.

3.5 Resultats

Aquesta secció mostra els principals resultats en termes de capacitat instal·lada, generació elèctrica i costos dels diferents escenaris d'abastiment d'energia implementats. Tot i no introduir canvis en l'abastiment d'energia respecte l'actualitat, a mode comparatiu, s'inclouen els resultats de l'escenari Referència i l'escenari Eficient.

3.5.1 Escenari de referència

L'escenari Referència manté la infraestructura d'abastiment elèctric actual a banda de l'ampliació de la interconnexió amb França. Aquesta ha entrat en servei l'any 2016, uneix l'Ospitalet i l'estació transformadora i repartidora (ETR) de Grau Roig i permet duplicar la capacitat d'importació arribant així als 225 MW. En aquest escenari la demanda incrementa fins als 1005 GWh l'any 2050 i es cobreix gràcies a l'augment de les importacions. El petit

³⁰ Comunicació personal

increment de la generació hidroelèctrica mostrat en els resultats a partir de l'any 2016 (veure Fig. 3.13) és degut a que l'aportació de la central d'Escaldes va ser especialment baixa l'any 2015 respecte anys anteriors.

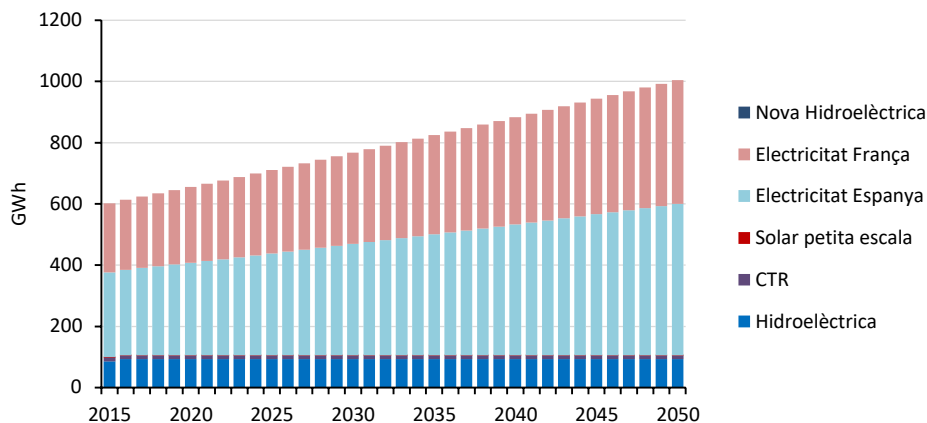


Fig. 3.13. Abastiment elèctric anual segons tecnologia en l'escenari Referència

Tal com es mostra en la Taula 3.4, els costos acumulats del conjunt del sistema energètic ascendeixen a 3707 M€, dominats principalment per les importacions d'energia.

3.5.2 Escenari Eficient

L'escenari Eficient disposa de la mateixa capacitat instal·lada que l'escenari Referència (veure Taula 3.4) i segueix una tendència de creixement en l'abastiment elèctric pràcticament idèntica (veure Fig. 3.14) ja que la futura introducció de vehicles elèctrics compensa les millores d'eficiència en els altres sectors.

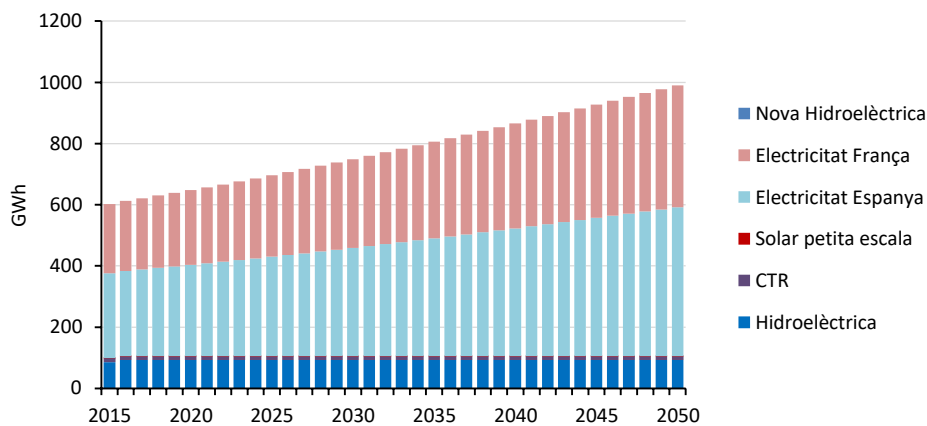


Fig. 3.14. Abastiment elèctric anual segons tecnologia en l'escenari Eficient

En la Taula 3.4 s'observa una disminució considerable de costos respecte l'escenari de referència degut a la reducció en el cost de les importacions i les externalitats (emissions de CO₂). Cal matisar aquest resultat ja que aquests tenen en compte únicament els costos d'inversió, d'O&M i d'importació de recursos. És a dir, no es contempla el cost de desenvolupar polítiques d'estalvi com les implementades en l'escenari Eficient. Disposar d'informació suficient en aquest sentit és de gran interès per tal de poder obtenir resultats més realistes. Un bon exemple d'obtenció d'informació en aquesta línia és l'anàlisi de l'impacte del Programa Engega 2014-2015³¹ (Travesset-Baro et al., 2016) on s'estima el cost de reducció d'energia i emissions d'aquesta política d'estalvi.

La Fig. 3.18 mostra la potència elèctrica mitjana mensual subministrada pel sistema en els diferents escenaris l'any 2050. El pic màxim es produeix el mes de Desembre i s'eleva fins als 149 MW. Cal assenyalar que en l'any base del model aquest és de 89 MW.

3.5.3 Escenari Llibre Blanc

En l'escenari Llibre Blanc, la introducció de nova capacitat de generació autòctona a partir de l'any 2020 permet diversificar l'abastiment elèctric. S'aposta fermament per la cogeneració amb GNL i tal com s'observa en la Fig. 3.15 aquesta passa a ser la principal font de generació a partir de l'any 2040 cobrint un 38% de la demanda d'electricitat nacional. Malgrat la introducció de noves tecnologies de generació en el sistema energètic, el sector elèctric segueix essent altament dependent de les importacions. L'any 2050 es produeix un increment elevat de les importacions provocat per la retirada d'instal·lacions de CHP GNL i biomassa que arriben al final de la seva vida útil.

³¹ El Programa Engega és un pla d'ajuts per a la compra de vehicles amb l'objectiu de millorar l'eficiència energètica i la seguretat del parc automobilístic andorrà

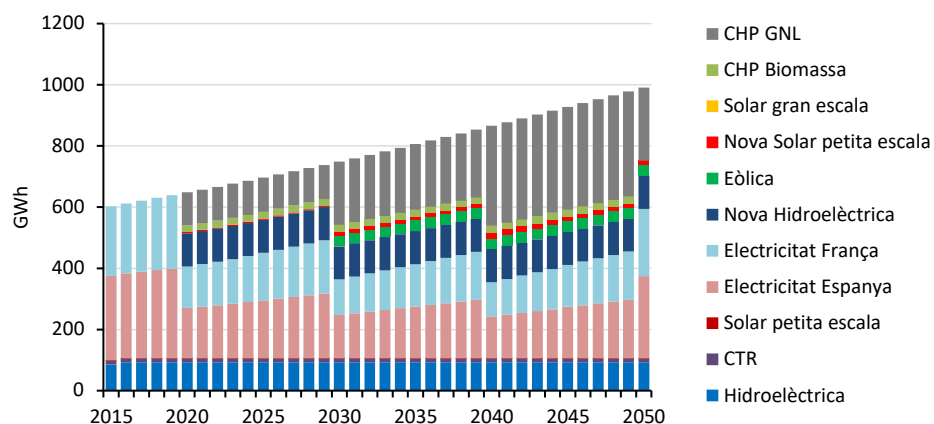


Fig. 3.15. Abastiment elèctric anual segons tecnologia en l'escenari Llibre Blanc

Tot i incrementar-se els costos d'inversió i O&M respecte de l'escenari Eficient, el cost acumulat l'any 2050 és sensiblement inferior degut a l'estalvi en les importacions.

La corba de potència mensual mitjana (Fig. 3.18) mostra com durant els mesos de maig i juny el sistema elèctric gairebé aconsegueix prescindir de les importacions gràcies a la baixa demanda i a la major disponibilitat de recurs hídric.

3.5.4 Escenari Òptim

L'escenari Òptim disposa de la major capacitat d'abastiment elèctric dels escenaris implementats (667 MW l'any 2050). Prioritza la introducció de forma immediata de centrals minihidroelèctriques i de cogeneració amb biomassa. En posteriors etapes introdueix l'energia eòlica (any 2022), la solar fotovoltaica a gran escala (any 2034) i per últim, la cogeneració amb GNL (any 2043). Entre les diferències remarcables respecte l'escenari Llibre Blanc s'observa la major capacitat instal·lada de tecnologia eòlica, la conveniència d'introduir energia solar fotovoltaica a gran escala i la introducció de la cogeneració amb GNL en una etapa molt més avançada, prioritzant altres tecnologies a curt i mig termini. D'altra banda s'aprecia un canvi molt significatiu en les importacions, passant a provenir en la seva totalitat de França. Aquest fet, a priori poc realista, es dona perquè l'algoritme d'optimització prioritza les importacions franceses degut al seu menor factor d'emissions i com a conseqüència, menor cost de les externalitats.

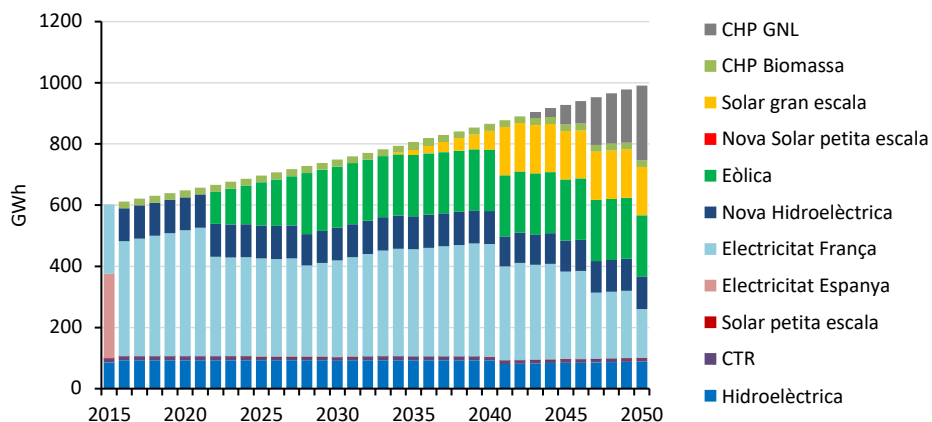


Fig. 3.16. Abastiment elèctric anual segons tecnologia en l'escenari Òptim

Tal com n'exigeix la seva pròpia definició, l'escenari Òptim és el de menor cost entre tots els simulats gràcies a la reducció de costos en les importacions i en les externalitats (veure Taula 3.4).

Com es pot observar en la Fig. 3.18, l'alta capacitat de generació instal·lada permet que d'abril a agost de l'any 2050 el sistema pugui prescindir de les importacions d'electricitat.

3.5.5 Escenari Òptim amb límit de CO₂

L'escenari Òptim amb límit de CO₂ i l'Òptim segueixen una evolució idèntica fins l'any 2046. L'any següent, la potència instal·lada de cogeneració amb GNL en l'escenari amb límits creix fins als 21,5 MW i roman constant fins l'últim any de simulació del model, mentre que en l'escenari Òptim s'enfila fins als 47 MW. Aquesta diferència en els últims anys del model fa que la capacitat total elèctrica instal·lada l'any 2050 es situï en 641 MW, una mica per sota que en l'escenari sense límits.

Tal com es pot observar en la Fig. 3.17, a diferència de l'escenari Òptim, la generació elèctrica anual amb CHP GNL s'estabilitza a partir de l'any 2047, moment a partir del qual l'increment de la demanda es cobreix mitjançant electricitat importada de França.

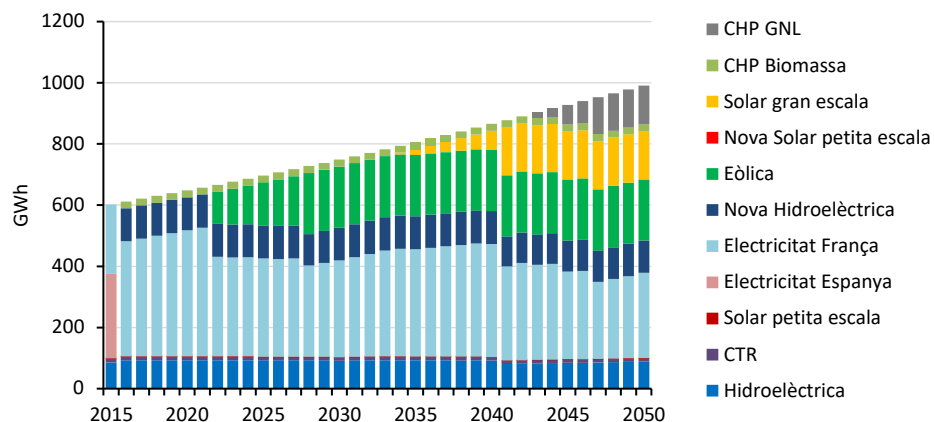


Fig. 3.17. Abastiment elèctric anual segons tecnologia en l'escenari Òptim amb límit de CO₂

El cost total acumulat l'any 2050 de l'escenari Òptim amb límit d'emissions és de 3121 milions d'euros. És a dir, el sobrecost degut a la imposició del límit d'emissions és únicament d'uns 3 milions d'euros, provocat per l'augment en el cost de les importacions (veure Taula 3.4).

La corba de potència mensual mitjana de l'any 2050 (veure Fig. 3.18) és molt similar a la de l'escenari Òptim, tot i que en aquest cas, el sistema requereix d'importacions d'electricitat durant el mes d'agost degut a la menor capacitat instal·lada de CHP GNL.

		Referència		Eficient		Llibre Blanc		Òptim		Òptim (límit CO ₂)	
		2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Capacitat instal·lada (MW)	Hidroelèctrica	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00
	CTR	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Solar petita escala	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
	Electricitat Espanya	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00
	Electricitat França	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00	225,00
	Nova Hidroelèctrica	-	-	-	-	23,70	23,70	23,70	23,70	23,70	23,70
	Eòlica	-	-	-	-	13,00	13,00	73,65	73,65	73,65	73,65
	Nova Solar petita escala	-	-	-	-	10,20	12,00	-	-	-	-
	Solar gran escala	-	-	-	-	-	-	-	117,16	-	117,16
	CHP Biomassa	-	-	-	-	3,00	-	3,00	3,00	3,00	3,00
	CHP GNL	-	-	-	-	30,00	32,00	-	47,00	-	21,51
	Total	402,34	402,34	402,34	402,34	482,24	504,44	502,69	666,85	502,69	641,36
	Costos (M€)	Inversió	-	-	-	-	58,33	157,37	69,64	176,96	69,64
O&M fix		16,61	25,37	16,61	25,37	30,16	60,12	40,58	83,02	40,58	82,61
O&M variable		6,04	9,24	6,04	9,24	13,60	27,73	16,89	30,69	16,89	30,52
Importacions		1.730,58	3.470,46	1.654,54	3.119,13	1.539,87	2.728,12	1.508,30	2.693,85	1.508,30	2.700,27
Emissions de CO ₂		128,91	201,95	121,57	178,43	119,43	176,65	95,97	133,90	95,97	133,54
Total		1.882,15	3.707,01	1.798,77	3.332,16	1.761,38	3.149,99	1.731,38	3.118,42	1.731,38	3.121,30

Taula 3.4. Capacitat instal·lada i costos³² l'any 2030 i 2050 en els diferents escenaris d'abastiment d'energia³² Costos actualitzats i acumulats

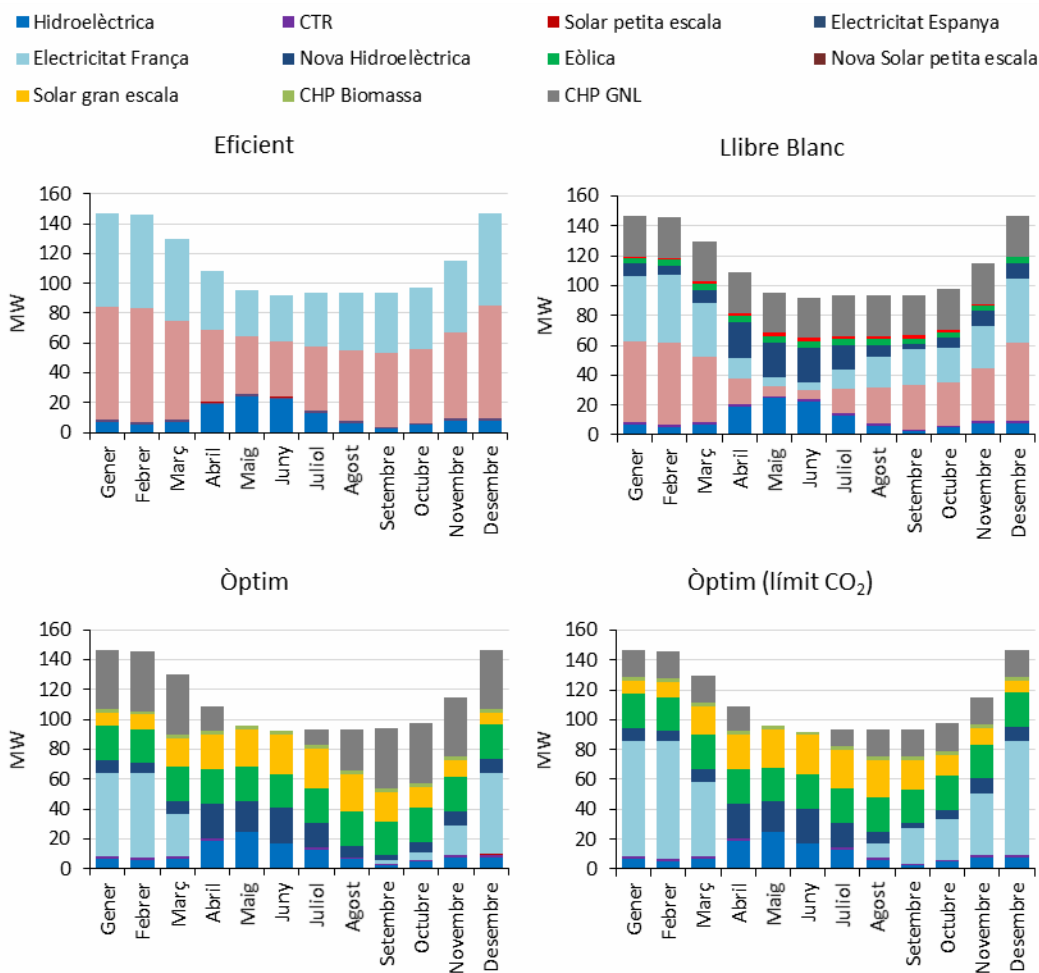


Fig. 3.18. Potència elèctrica mitjana mensual subministrada pel sistema en els diferents escenaris l'any 2050

3.6 Discussió

Havent finalitzat la implementació dels mòduls de demanda i abastiment del model LEAP-Andorra, s'han presentat els principals resultats en els dos àmbits cabdals del sistema energètic. Cal tenir en compte una sèrie de limitacions de la metodologia desenvolupada a l'hora d'interpretar aquests resultats:

- (1) La incertesa inherent de les diferents assumpcions realitzades. En aquest sentit, són especialment remarcables les projeccions a llarg termini utilitzades en el model com els costos dels recursos energètics, l'evolució del PIB, la població i el turisme.

- (2) Les dades relatives als costos de les diferents tecnologies disponibles de generació elèctrica es basen majoritàriament en bibliografia publicada per organismes internacionals de referència. Disposar d'informació de costos locals podria provocar canvis significatius en els resultats obtinguts, especialment en els escenaris d'optimització. El cas de l'energia eòlica és particularment crític ja que els seus costos d'instal·lació i O&M són més elevats que en països veïns degut a l'accidentada topografia del país (Moles and Cereza, 2010). Els escenaris d'optimització obtinguts la situen com una de les tecnologies a prioritzar a curt termini, resultats que podrien variar si el model contemplés els costos locals.
- (3) L'elecció de l'escala temporal escollida per modelitzar l'abastiment elèctric té influència sobre els resultats obtinguts. En el model LEAP-Andorra s'ha optat per treballar a escala mensual, tenint en compte les dades disponibles en l'actualitat i buscant un compromís entre resolució i temps de càlcul. Tal com es presenta en Deane et al. (2012) i Pina et al. (2011), l'augment de la resolució temporal repercuteix en els escenaris resultants. Treballar a major resolució (p.ex. horària) permetria també poder analitzar amb major precisió un factor crític per a la xarxa elèctrica com són els pics de consum. En el model actual, aquests s'estimen a escala mensual (veure Fig. 3.18), quedant subestimats en relació als pics horaris. Per exemple, segons la corba de consum elèctric horari de l'any 2015, el valor màxim assolit s'eleva als 125 MW mentre que la mitjana mensual en el LEAP-Andorra és de 89 MW.
- (4) En l'abastiment elèctric local, la versió actual del model LEAP-Andorra agrega els diferents processos segons tipus de tecnologia de generació. Per tal de representar de forma més acurada la realitat, seria interessant segregar els processos segons instal·lacions específiques independentment de la tecnologia utilitzada ja que tecnologies del mateix tipus poden tenir costos diferents en funció de les característiques del projecte (p.ex. disponibilitat del recurs, infraestructura d'evacuació elèctrica disponible, etc.).
- (5) Els potencials teòrics de les diferents fonts d'energia així com les capacitats elèctriques màximes instal·lables dels escenaris d'optimització presentades en la Taula 3.3, es basen en estudis interns de l'OECC. Aquests són útils per definir uns valors de partida del model però és necessari seguir treballant en aquesta línia per fer més acurades aquestes estimacions. En aquest sentit, la Secció 3.6.1 presenta un cas d'estudi realitzat a Andorra per abordar aquestes limitacions.

3.6.1 Potencial de l'energia solar fotovoltaica en cobertes d'edificis

En la línia d'abordar les limitacions existents pel que fa al coneixement dels potencials teòrics de les diferents fonts d'energia autòctones, s'ha treballat en l'estimació del potencial de l'energia solar fotovoltaica en les cobertes d'edificis del país. Aquest treball s'ha iniciat a través del projecte *Potencial d'aprofitament solar en cobertes d'edificis del Pirineu*³³ coordinat per l'OBSA i realitzat en el marc dels ajuts de recerca de la Comunitat de Treball dels Pirineus.

A diferència d'altres zones geogràfiques, la disponibilitat del recurs solar en zones de muntanya és molt heterogènia, essent altament influenciada per la topografia. L'objectiu d'aquest projecte és doble, d'una banda desenvolupar una metodologia que permeti avaluar el potencial d'aprofitament solar en zones de muntanya i d'altra banda incentivar l'adopció d'aquesta tecnologia per part de les administracions i dels ciutadans.

Existeixen diferents mètodes per estimar el potencial fotovoltaic de grans àrees geogràfiques, des de mètodes simples basats en factors aplicats al total de superfície de cobertes disponibles fins a mètodes més complexos basats en Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) i/o models tridimensionals (3D). A diferència dels mètodes simples, els models SIG-3D aporten major detall i són més replicables entre diferents zones. Com a contrapartida, aquests mètodes són més costosos tant en temps com en recursos computacionals (Melius et al., 2013).

En aquest estudi s'ha treballat amb un model SIG-3D d'Andorra per tal de representar de forma acurada les zones urbanes i la topografia del seu entorn. A diferència d'altres estudis també centrats en l'àmbit urbà (Brito et al., 2012; Cellura et al., 2012; Redweik et al., 2013) però ubicats en zones planes, en aquest cas la influència de la topografia és determinant en els resultats finals. En aquest sentit, és important caracteritzar adequadament les muntanyes per tal de representar les ombres que provoquen i en conseqüència, la limitació provocada en el nombre d'hores d'insolació que s'obtindrà en les zones d'estudi. El potencial fotovoltaic en les cobertes dels edificis de les zones d'estudi s'ha estimat mitjançant l'eina *Solar Analyst*, l'extensió d'ArcGis per modelitzar la irradiació solar (Fu and Rich, 1999). Per la generació del model 3D s'utilitzen dades LiDAR (*Light Detection And Ranging*) del vol realitzat per l'Institut Cartogràfic de Catalunya l'any 2006, amb les que s'ha construït un model digital d'elevacions (MDE) d'1x1 m de resolució. Aquesta es considera la resolució mínima per tal de representar de forma acurada característiques de

³³ En l'enllaç http://www.obsa.ad/leapandorra/docs/informe_CTP_solar_OBSA.pdf s'inclou la memòria tècnica del projecte

les cobertes com el pendent, l'orientació o estructures adjacents i vegetació (Kodysh et al., 2013). La Fig. 3.19 mostra el MDE d'alta resolució d'Escaldes-Engordany i el seu entorn.



Fig. 3.19. Model 3D d'alta resolució d'Escaldes-Engordany i la topografia de l'entorn

Els resultats obtinguts a la parròquia d'Escaldes-Engordany mostren un potencial màxim de generació elèctrica fotovoltaica en les cobertes dels edificis de 21 GWh/any mitjançant una potència instal·lada de 30 MWp. El Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra (Govern d'Andorra, 2012) estimava el potencial de la totalitat del país en 18 GWh/any. Tenint en compte que la població d'Escaldes-Engordany representa aproximadament un 18% del total de població andorrana, podem afirmar que el potencial teòric del país serà molt més gran que l'establert en el Llibre Blanc. Travesset-Baro et al. (2017) detallen la metodologia desenvolupada i els resultats obtinguts.

A banda de l'interès de l'anàlisi tècnic, un element clau del projecte és la implementació d'una plataforma online pública per aportar informació als usuaris sobre el potencial energètic, la rendibilitat econòmica i els estalvis mediambientals d'hipotètiques instal·lacions d'energia solar en les cobertes dels seus edificis i d'aquesta manera fomentar-ne la seva implantació. La Fig. 3.20 mostra el potencial d'aprofitament fotovoltaic de les cobertes d'Escaldes-Engordany on a través del mapa interactiu³⁴ s'obté informació detallada de cada una de les cobertes. A banda dels resultats d'Escaldes, des de la plataforma <http://www.obsa.ad/solar> es pot accedir als resultats obtinguts en les altres parròquies d'Andorra.

³⁴ Publicat a <http://www.obsa.ad/solar>

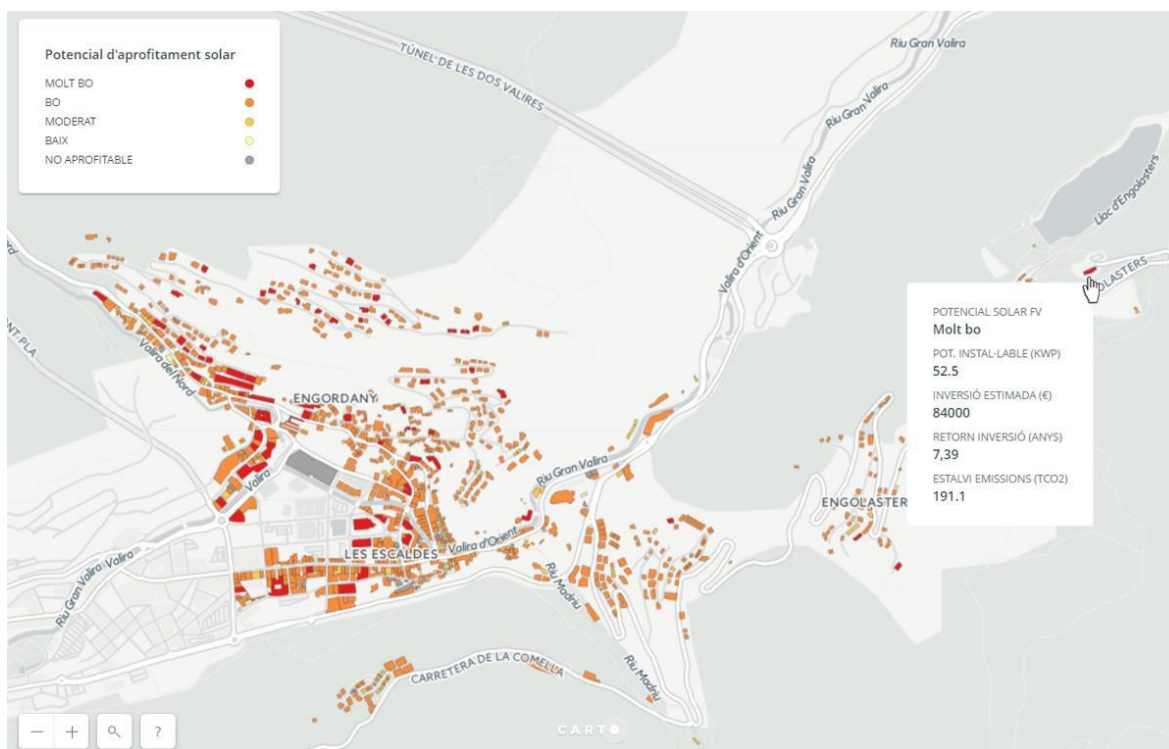


Fig. 3.20. Potencial d'aprofitament fotovoltaic de les cobertes d'Escaldes-Engordany

3.6.2 Demanda de recursos energètics en els diferents escenaris futurs

Un dels principals reptes a afrontar en el sistema energètic d'Andorra és reduir l'alta dependència energètica del país (96% de l'energia total és importada en l'actualitat). La Fig. 3.21 mostra el consum de recursos dels diferents escenaris l'any 2050 expressats en energia primària. El càlcul de l'energia primària s'ha realitzat mitjançant els factors de conversió presentats en la Taula 3.5 i el mètode *Physical energy content*³⁵ utilitzat per l'IEA, l'OCDE i Eurostat (IEA/OECD, 2005). Tot i que l'escenari amb límit de CO₂ té un menor nombre d'emissions l'any 2050 que l'Òptim, el seu consum d'energia primària és major degut a l'elevat factor de conversió de l'electricitat francesa.

El sol, el vent, l'aigua, els residus i la biomassa són recursos propis del sistema, mentre que la totalitat dels pèl·lets són importats degut a l'absència de producció local. Cal remarcar que en tots els escenaris resultants, la biomassa autòctona seria suficient per cobrir la demanda per a la generació elèctrica ja que en cap cas s'arriba als 60 GWh establerts pel Llibre Blanc de l'Energia com a potencial màxim d'aprofitament del país.

³⁵ En aquesta metodologia, el consum d'energia primària relatiu a la generació hidroelèctrica, eòlica i solar fotovoltaica s'estableix igual a la generació d'electricitat

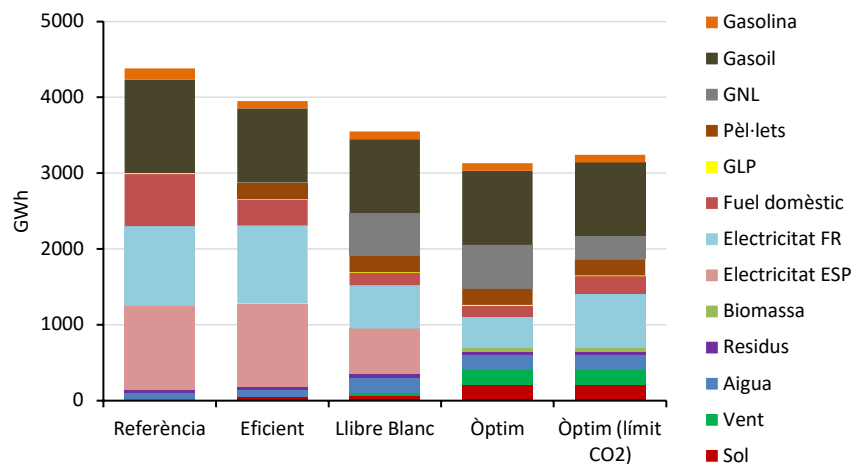


Fig. 3.21. Consum total d'energia primària del sistema energètic en els diferents escenaris l'any 2050

Energia secundària	Factor de conversió a energia primària
Electricitat Espanya	2,25
Electricitat França	2,58
Fuel domèstic	1,12 ³⁶
GLP	1,05
Pèl·lets	1,25
GNL	1,07
Gasoil	1,12
Gasolina	1,10

Taula 3.5. Factors de conversió d'energia final a energia primària. Font: IDAE (2012) i Rte (2016)

3.6.3 Compliment dels compromisos climàtics

En el Capítol 2, concretament en la Secció 2.8.3, s'analitza el potencial de reducció d'emissions de l'escenari Eficient i es discuteix la capacitat de complir amb el compromisos climàtics establerts en l'INDC. En aquest, Andorra es compromet a la reducció de GEH en un 37% l'any 2030 respecte l'escenari de referència. Els resultats obtinguts en l'escenari Eficient, on s'apliquen únicament mesures en el mòdul de demanda, mostren un potencial d'estalvi d'un 14%, deixant palesa la necessitat d'incloure mesures en l'abastiment d'energia per poder complir amb els compromisos climàtics.

Els escenaris implantats en el present capítol parteixen de l'escenari Eficient i incorporen variacions en l'abastiment d'energia. En la Fig. 3.22 s'observa com els escenaris

³⁶ S'utilitza el mateix factor que pel gasoil ja que a Andorra és el mateix combustible

d'optimització són els únics que aporten una disminució a llarg termini en la intensitat de CO₂ de l'abastiment elèctric. La introducció de la CHP amb gas natural provoca un increment a partir de l'any 2043 que es frena l'any 2047 en l'escenari amb límits per tal de complir amb les restriccions imposades.

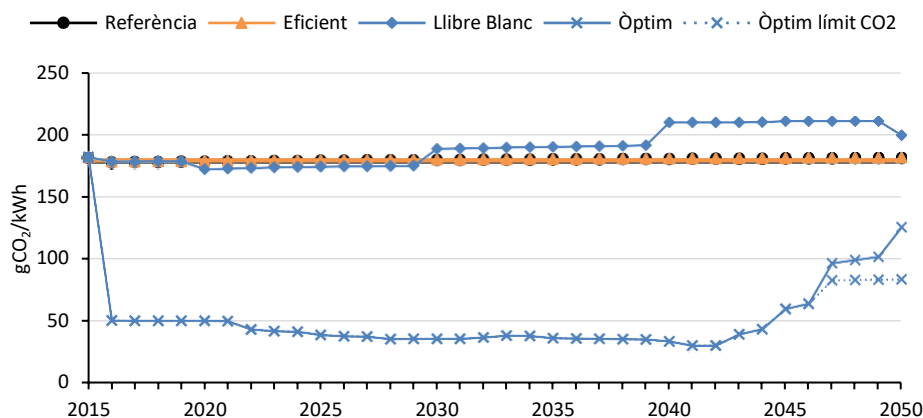


Fig. 3.22. Intensitat de CO₂ de l'abastiment elèctric en els diferents escenaris del model LEAP-Andorra

Tal com s'observa en la Fig. 3.22, en els escenaris d'optimització es produeix un descens sobtat en la intensitat de CO₂ de l'abastiment elèctric l'any 2016. Aquesta davallada es deguda a que l'algoritme d'optimització força que la totalitat de les importacions provinguin de França, reduint així les emissions i el cost de les externalitats. De ben segur que la realitat no permetrà que això sigui així ja que les variacions de preu entre l'electricitat espanyola i francesa i les tasques de manteniment condicionen la importació a través d'una o altra línia. En aquest sentit, disposar d'una estimació dels preus mensuals de les importacions d'ambdós països aportaria major veracitat al model. L'augment de la resolució temporal també milloraria aquest aspecte ja que enlloc de definir una disponibilitat anual es podria definir en intervals que limitessin l'ús d'una o altra línia per motius tècnics.

D'altra banda, cal remarcar que el model considera constants els factors d'emissions de l'electricitat importada. Presumiblement aquest hauria de millorar considerablement a Espanya en els propers anys per tal de fer front als reptes climàtics (García-Gusano et al., 2017) mentre que les possibilitats de millora en el cas de França són molt més limitades.

La Fig. 3.23 mostra les emissions de GEH dels diferents escenaris en els anys 2030 i 2050 i les compara amb l'objectiu definit en l'INDC i la restricció imposada en l'últim any de simulació del model. Tal com es pot observar, els dos escenaris d'optimització compleixen l'INDC però només l'escenari amb límits s'adapta a la restricció imposada l'any 2050 (50% de reducció respecte l'escenari Referència). És important remarcar que aquests escenaris comparteixen de l'escenari Eficient on s'han aplicat un bon nombre de mesures d'eficiència

energètica. Per tant, segons els escenaris resultants és imprescindible la combinació de mesures en l'àmbit de la demanda i l'abastiment per tal de poder complir amb els compromisos climàtics. Si en compte de partir de l'escenari Eficient, ho féssim del Referència, l'escenari òptim no compliria l'INDC (326190 TCO₂eq) i no existeix cap solució resultant en que es pugui complir amb les restriccions d'emissions imposades.

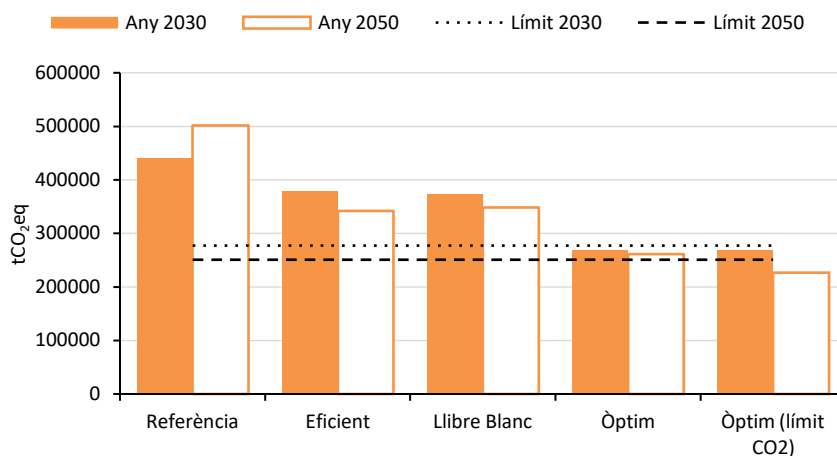


Fig. 3.23. Emissions de GEH en els diferents escenaris del model LEAP-Andorra

Els resultats obtinguts mostren la viabilitat de complir amb els compromisos establerts l'any 2030 en l'INDC. Seria convenient definir objectius més enllà d'aquesta data per tal de facilitar la planificació energètica a llarg termini. Els resultats de l'escenari Òptim amb límit de CO₂ demostren que és possible reduir les emissions un 50% l'any 2050 sense incrementar substancialment els costos econòmics respecte l'escenari de menor cost.

El full de ruta de la UE per a una transició cap a una economia de baixes emissions, estableix com a objectiu reduir l'any 2050 el 80% de les emissions respecte els nivells de 1990 (Comissió Europea, 2016). Així doncs, si es vol estar en la línia dels països de la UE, caldrà explorar nivells de reducció d'emissions més ambiciosos que els considerats en l'escenari Òptim amb límit de CO₂. En la mateixa línia, també seria d'interès establir les reduccions d'emissions respecte a 1990 o 2005, anys de referència habituals pels anàlisis de la Comissió Europea.

Com tot estudi prospectiu, l'anàlisi presentat en aquest capítol està subjecte a múltiples assumpcions. Són especialment incertes les associades als costos, tant de les tecnologies com dels preus de les fonts d'energia. En aquest sentit, els resultats dels escenaris presentats han de ser entesos com un punt de partida coherent que serveixi de suport i incentiu a futurs anàlisis d'alternatives.

3.7 Referències

- AVEBIOM, 2016. Índice de precios del pellet doméstico en España 1T 2012 - 2T 2016.
- Badia Llimós, E., 2012. Disseny del sistema elèctric i de control dels grups generadors de la central de cogeneració de Soldeu, Andorra. Projecte final carrera. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Brito, M., Gomes, N., Santos, T., Tenedório, J., 2012. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Sol. Energy* 86, 283–288. doi:10.1016/j.solener.2011.09.031
- Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Papadopoulos, D., Siskos, P., Apostolaki, E., Zampara, M., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Kouvaritakis, N., Höglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Böttcher, H., Frank, S., Havlík, P., Gusti, M., Witzke, H., 2013. EU Energy, Transport and GHG Emissions: Trends to 2050, Reference Scenario 2013. doi:10.2833/17897
- Cellura, M., Di Gangi, a., Longo, S., Orioli, a., 2012. Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contexts: An Italian case study. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2041–2052. doi:10.1016/j.rser.2012.01.032
- Comissió Europea, 2016. 2050 low-carbon economy. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en
- Deane, J.P., Chiodi, A., Gargiulo, M., Ó Gallachóir, B.P., 2012. Soft-linking of a power systems model to an energy systems model. *Energy* 42, 303–312. doi:10.1016/j.energy.2012.03.052
- European Commission, 2016a. Weekly oil bulletin [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/weekly-oil-bulletin> (accessed 6.14.16).
- European Commission, 2016b. Quarterly Report on European Gas Markets.
- FEDA, 2016a. Energia. URL: <https://www.feda.ad/energia-i-meteo/energia> (accessed 6.1.16).
- FEDA, 2016b. Línies elèctriques. URL: <https://www.feda.ad/sobre-feda/instal-lacions/linies-electriques> (accessed 6.7.16).
- FEDA, 2014. Memòria Responsabilitat Social Corporativa Forces Elèctriques d'Andorra.
- Fu, P., Rich, P.M., 1999. Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. 19th Annu. ESRI User Conf. 1–24.

- García-Gusano, D., Garraín, D., Dufour, J., 2017. Prospective life cycle assessment of the Spanish electricity production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75. doi:10.1016/j.rser.2016.10.045
- Govern d'Andorra, 2015. Contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN) de l'Andorre.
- Govern d'Andorra, 2012. Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra.
- Howells, M., Rogner, H., Strachan, N., Heaps, C., Huntington, H., Kypreos, S., Hughes, A., Silveira, S., DeCarolis, J., Bazillian, M., Roehrl, A., 2011. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy* 39, 5850–5870. doi:10.1016/j.enpol.2011.06.033
- IDAE, 2012. Factores de conversión energía final -energía primaria y factores de emisión de CO₂. URL: <http://www.idae.es/> (accessed 11.8.13).
- IEA/NEA, 2015. Projected Costs of Generating Electricity. Paris, France. doi:10.1787/9789264084315-en
- IEA/OECD, 2005. Energy Statistics–Manual. Paris, France. doi:10.1787/9789264033986-en
- IRENA, 2015. Renewable Power Generation Costs in 2014. Bonn, Germany.
- Kodysh, J.B., Omitaomu, O.A., Bhaduri, B.L., Neish, B.S., 2013. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustain. Cities Soc.* 8, 31–41. doi:10.1016/j.scs.2013.01.002
- Melius, J., Margolis, R., Ong, S., 2013. Estimating Rooftop Suitability for PV : A Review of Methods , Patents , and Validation Techniques 35.
- Moles, A., Cereza, R., 2010. Perspectives de l'energia a Andorra, in: Societat Andorrana de Ciències (Ed.), 22a Diada Andorrana. pp. 77–86. doi:10.2436/15.0110.07.9
- OMIE, 2015. Informe de precios 2015.
- Pina, A., Silva, C., Ferrão, P., 2011. Modeling hourly electricity dynamics for policy making in long-term scenarios. *Energy Policy* 39, 4692–4702. doi:10.1016/j.enpol.2011.06.062
- Redweik, P., Catita, C., Brito, M., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Sol. Energy* 97, 332–341. doi:10.1016/j.solener.2013.08.036
- Rte, 2016. Le réseau de l'intelligence électrique. Key Figures [WWW Document]. URL <http://www.rte-france.com/en/eco2mix/chiffres-cles-en> (accessed 6.7.16).
- SEI, 2016. Training exercises for LEAP 2015.

Traveset-Baro, O., Francisco, G., Vilella, M., Pons, M., 2017. Building rooftops photovoltaic potential in mountainous regions : a case study from the Pyrenees, Extended abstract in European PV Solar Energy Conference. pp. 2-5.

Traveset-Baro, O., Pons, M., Rosas-Casals, M., 2016. Impact of the car purchase subsidy policy in Andorra: an ex-post analysis of CO2 emissions reduction, in: International Conference on Urban and Regional Resilience (RESURBE III).

4

SEGURETAT ENERGÈTICA A LLARG TERMINI EN ESCENARIS DE REDUCCIÓ D'EMISSIONS

Aquest capítol es centra en l'estudi de l'evolució de la seguretat energètica d'Andorra en diferents escenaris futurs. Analitza especialment els efectes de la transició cap a una economia de baixes emissions de CO₂ sobre la seguretat energètica del país. L'anàlisi es realitza a partir de l'escenari Referència i els quatre escenaris alternatius resultants del model LEAP-Andorra, juntament amb una bateria d'indicadors que representen la seguretat energètica actual i futura del país.

4.1 Avaluació de la seguretat energètica

El concepte de seguretat energètica utilitzat en aquesta tesi es basa en les perspectives històriques de sobirania, robustesa i resiliència definides per Cherp and Jewell (2011). Aquest marc conceptual es presenta en detall en el Capítol 1, Secció 1.1.4.

Tal com es detalla en el Capítol 1, Secció 1.3.1, la seguretat energètica s'avalua mitjançant indicadors que representen de forma quantitativa les vulnerabilitats del sistema energètic. Tot i que existeixen multitud d'indicadors en seguretat energètica, només alguns d'ells són aplicables a escenaris futurs.

L'escala geogràfica del model és un factor que condiciona en gran mesura els indicadors a seleccionar. En el cas de Jewell et al. (2014) l'escala global del model d'avaluació integrada MESSAGE complica la utilització d'indicadors de robustesa, ja que aquest no representa en detall les infraestructures. En el nostre cas, degut a l'escala nacional en que treballem, alguns d'ells han pogut ser incorporats i així representar aquesta perspectiva.

Partint dels indicadors proposats per ser utilitzats conjuntament amb models d'avaluació integrada (Jewell et al., 2014, 2012), se n'han identificat un conjunt d'aplicables a escala nacional i calculables a Andorra amb les dades actuals. En la selecció dels indicadors de seguretat energètica s'han tingut en compte els cinc criteris següents:

- (1) Han de ser rellevants per poder abordar problemàtiques actuals i futures.
- (2) Cal que siguin suficientment genèrics per poder ser aplicats en sistemes energètics radicalment diferents de l'actual.

- (3) Han de ser calculables amb les dades disponibles i les derivades dels escenaris futurs.
- (4) Cal que aportin informació addicional a la que proporcionen indicadors existents.
- (5) Han de reflectir les vulnerabilitats clau dels sistemes energètics vitals i clarificar els compromisos polítics.

L'escala geogràfica d'Andorra, així com les particularitats del seu sistema energètic (no importa energia primària i té una alta dependència de França i Espanya) són factors que han condicionat la selecció dels indicadors. En la Taula 4.1 es mostren els indicadors inclosos en el model LEAP-Andorra.

Indicador	Relació amb la seguretat energètica	Unitat	Definició	Sector/s d'aplicació	
Sobirania	Dependència de les importacions d'energia	Vulnerabilitat front a alteracions en l'abastiment de fonts d'energia	%	Importacions d'energia dividides pel total d'energia final	Total d'energia final Electricitat
	Cost de les importacions d'energia en relació amb el PIB	Vulnerabilitat front a alteracions en l'abastiment de fonts d'energia	%	Cost de les importacions dividit pel PIB	Total d'energia final Electricitat Combustibles fòssils
	Dependència de les energies secundàries a les importacions d'energia	Vulnerabilitat de les energies secundàries a alteracions en l'abastiment d'energia	%	Proporció de les energies secundàries generades amb importacions	Electricitat autòctona Calor CHP
	Dependència dels sectors consumidors d'energia final a les importacions d'energia	Vulnerabilitat dels sectors consumidors d'energia final a alteracions en l'abastiment d'energia	%	Proporció del consum d'energia dels diferents sectors cobert amb importacions	Residencial Transport Secundari Terciari Administració pública
	Capacitat disponible en generació elèctrica	Fiabilitat en la generació d'electricitat	%	Capacitat instal·lada dividida pel pic de consum	Electricitat
	Saturació de les línies d'importació d'electricitat	Fiabilitat en el subministrament d'electricitat	%	Pic de consum dividit per la capacitat d'importació	Electricitat

	Creixement del sector energètic	Pressió en el sistema energètic provocada pel ràpid creixement	%/any	Creixement anual en l'ús d'energia	Total d'energia primària Electricitat Combustibles fòssils Recursos renovables Residencial Transport Secundari Terciari Administració pública
Resiliència	Intensitat energètica	Vulnerabilitat front a l'abastiment d'energia	tep/M€	Energia primària dividida pel PIB real	Total d'energia primària
	Diversitat de fonts primàries d'energia	Vulnerabilitat front a alteracions en les fonts d'energia primàries	Adimensional	Índex de diversitat de Shannon-Wiener	Total d'energia primària
	Diversitat de fonts d'energia en les energies secundàries consumides	Vulnerabilitat de les fonts d'energia secundàries front a alteracions en les fonts d'energia primàries	Adimensional	Índex de diversitat de Shannon-Wiener	Electricitat Calor
	Diversitat de fonts d'energia en els sectors consumidors d'energia final	Vulnerabilitat dels sectors consumidors d'energia final a alteracions en l'abastiment d'energia	Adimensional	Índex de diversitat de Shannon-Wiener	Residencial Transport Secundari Terciari Administració pública

Taula 4.1. Indicadors en seguretat energètica integrats al model LEAP-Andorra. *Únicament energies secundàries generades al país

En la Taula 4.1 es pot apreciar una absència significativa d'indicadors de caire ambiental i especialment de la quantificació d'emissions de GEH. En aquest sentit, el càlcul de les emissions nacionals de CO₂ es realitza en paral·lel als indicadors presentats, considerant-la una variable fonamental en els diferents escenaris analitzats.

4.1.1 Estat actual de la seguretat energètica d'Andorra

Els sistemes energètics tenen una estructura complexa, on els aspectes relacionats amb la seguretat requereixen considerar les múltiples parts del sistema i les seves interrelacions. En un enfocament general del sistema és important identificar-ne els elements bàsics,

classificables en abastiment, transformació, distribució i ús final de serveis energètics (Jewell, 2011). Per abordar la seguretat energètica, és necessari entendre com les vulnerabilitats associades a les diferents parts del sistema poden afectar als serveis energètics.

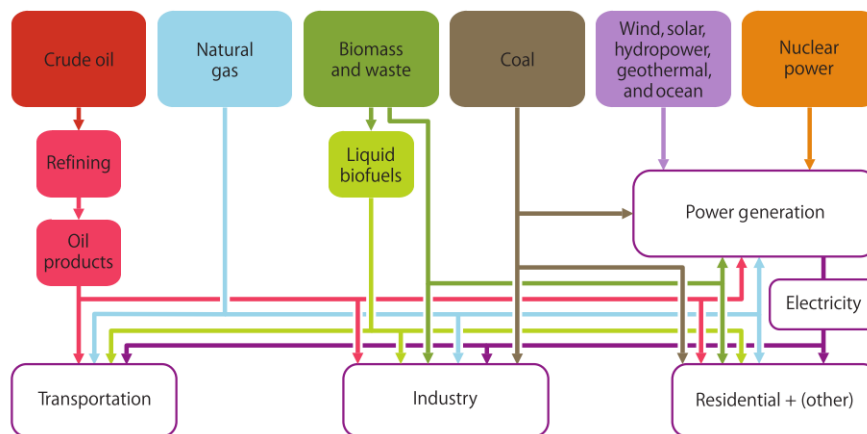


Fig. 4.1. Estructura general dels sistemes energètics. Font: Jewell 2011

L'enfocament presentat en la Fig. 4.1 és d'utilitat per tal d'identificar i entendre les fortaleses i debilitats dels sistemes energètics. En l'anàlisi de la seguretat energètica d'Andorra, com a primer pas es construeix l'esquema particular del sistema energètic del país mostrant les particularitats d'aquest respecte l'esquema general de la Fig. 4.1.

El diagrama de la Fig. 4.2 mostra el flux d'energia del sistema energètic d'Andorra. Pot apreciar-se com Andorra importa directament fonts secundàries d'energia provinents d'Espanya i França. En el cas de l'electricitat, es importa pràcticament a parts iguals d'un i altre país, amb un mix elèctric altament polaritzat per l'energia nuclear en el cas de França i més diversificat a Espanya. D'altra banda, els hidrocarburs són importats principalment d'Espanya en forma de gasoil, gasolina, fuel domèstic i en molt petita mesura, gas butà i propà.

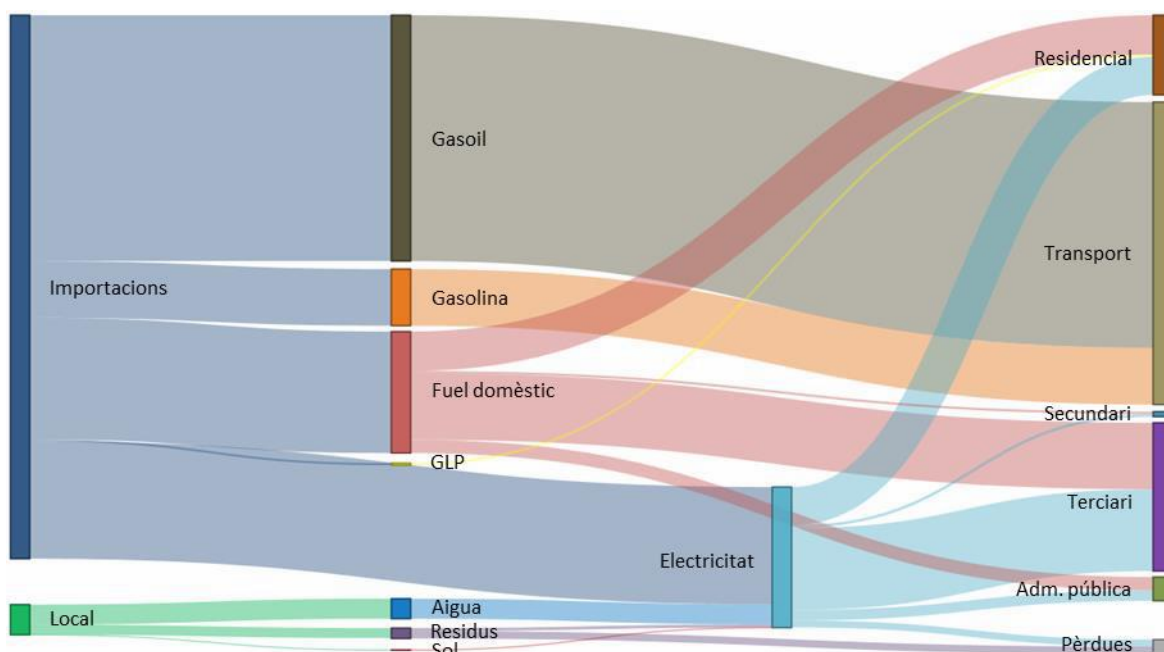


Fig. 4.2. Flux d'energia del sistema energètic d'Andorra l'any 2015. Infografia: Bruce McPherson

El consum d'energia final a Andorra va incrementar de forma continuada durant el període 1993-2005 amb una mitjana de creixement anual superior al 4%, moment en el que s'assoleix un pic en la demanda. Des de l'any 2005 s'aprecia un lleuger descens en els consums fins establir-se en l'actualitat a nivells equivalents als de l'any 2000. La crisi econòmica i el retrocés de la població, elements estretament relacionats a Andorra, es presenten com els principals factors responsables d'aquest constrenyiment del consum. La Fig. 4.3 mostra l'històric disponible d'evolució del consum d'energia final (Departament d'Estadística, 2017). La composició del consum segons fonts d'energia presenta una clara tendència de canvi cap a l'electricitat, guanyant terreny any rere any als hidrocarburs. Tot i aquest factor, els combustibles fòssils representen encara més del 75% de l'energia final del país, sense comptabilitzar la part que porta intrínseca l'electricitat. Aquests estan dominats principalment pels derivats del petroli utilitzats en transport i calefacció, a més d'una aportació gairebé insignificant de carbó, gas butà i propà. En els carburants de locomoció, seguint la tònica europea, s'aprecia una clara dieselització en detriment de la gasolina.

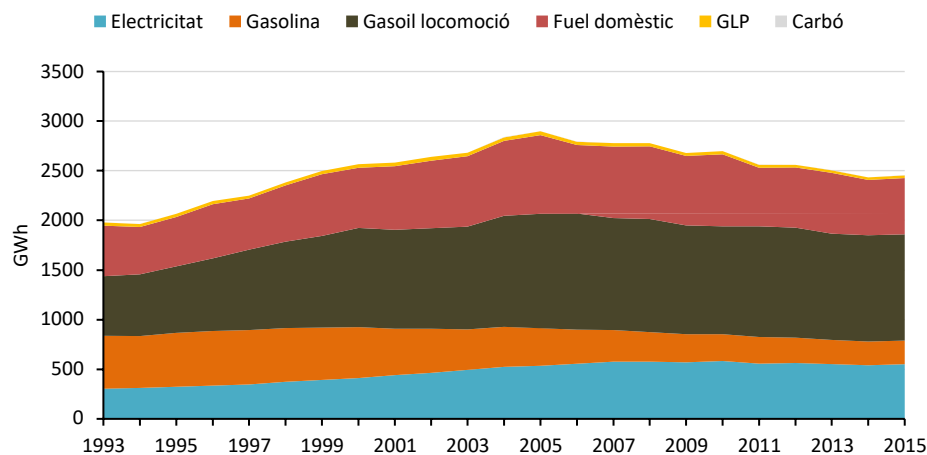


Fig. 4.3. Consum d'energia final durant el període 1993-2015

L'alta vinculació de l'economia andorrana als combustibles fòssils (importats al 100%) és la principal causa de l'important dependència energètica del país. Pel que fa a l'electricitat, la generació interna acostuma a representar al voltant del 15% del consum elèctric del país, apreciand-se únicament petites fluctuacions provocades per la variabilitat de la generació hidroelèctrica.

Respecte a la intensitat energètica³⁷, la dinàmica decreixent dels primers anys de segle va quedar interrompuda el 2007, precedida per un creixement continuat fins l'any 2012. Tot i que a Andorra va disminuir el consum d'energia primària des de l'inici de la crisi econòmica, aquesta reducció no va ser proporcional a la del PIB, provocant un canvi de tendència en la intensitat energètica del país en aquest període. Posteriorment s'ha produït una estabilització d'aquest indicador assolint un valor de 152 tep/M€ en l'actualitat, valor sensiblement superior al de països del seu entorn en gran mesura degut a les importacions associades al *fuel tourism*. La Taula 4.2 presenta els valors l'any 2015 de tres indicadors associats a la seguretat energètica actual d'Andorra³⁸ i els contextualitza comparant-los amb els de França, Espanya i la UE (Eurostat, 2017).

³⁷ La intensitat energètica es defineix com la quantitat d'energia utilitzada per generar una unitat de PIB

³⁸ Valors calculats a través del model LEAP-Andorra

	Andorra	França	Espanya	UE28
Dependència energètica (%)	95	46	73	54
Intensitat energètica (tep/M€)	152	121	114	120
Emissions per càpita (tCO₂)	6,15	5,72	6,23	7,57

Taula 4.2. Indicadors associats a la seguretat energètica l'any 2015. Font: LEAP-Andorra i Eurostat (2017)

4.2 Seguretat energètica futura

La seguretat energètica futura s'analitza a través dels cinc escenaris definits en el model LEAP-Andorra (Capítol 3 Secció 3.4). Es parteix de l'escenari de referència on no s'introdueix cap política climàtica i es compara amb un escenari on només s'actua sobre la demanda (Escenari Eficient) i tres escenaris amb actuacions tant en demanda com en abastiment (Escenari Llibre Blanc, Escenari Òptim, Escenari òptim amb límit de CO₂).

La reducció d'emissions de CO₂ és un objectiu comú en qualsevol dels escenaris estudiats i a tenir en compte paral·lelament als indicadors presentats en la Taula 4.1. La Fig. 4.4 mostra la reducció d'emissions respecte l'escenari de referència en els diferents escenaris resultants.

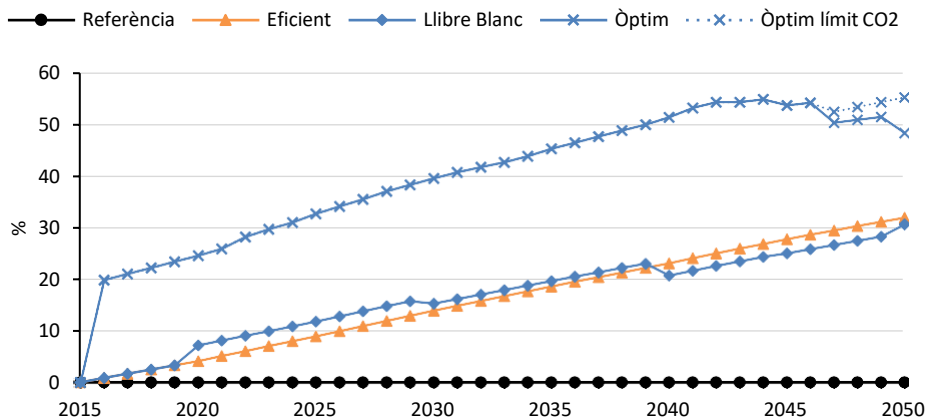


Fig. 4.4. Reducció d'emissions en els escenaris del model LEAP-Andorra

A continuació es mostren els diagrames de Sankey representant el sistema energètic l'any 2050 en cada un dels escenaris del model LEAP-Andorra.

4.2.1 Escenari de referència

L'escenari Referència l'any 2050, mostrat en la Fig. 4.5, presenta pocs canvis respecte el mateix escenari l'any 2015 (veure Fig. 4.2). L'únic destacable és la tímida introducció de l'energia solar en el sector residencial degut al recent decret de modificació del reglament de la construcció (BOPA 80/2015) en el qual s'aprova que almenys el 40% de la producció d'ACS de les noves llars ha de provenir d'energies renovables.

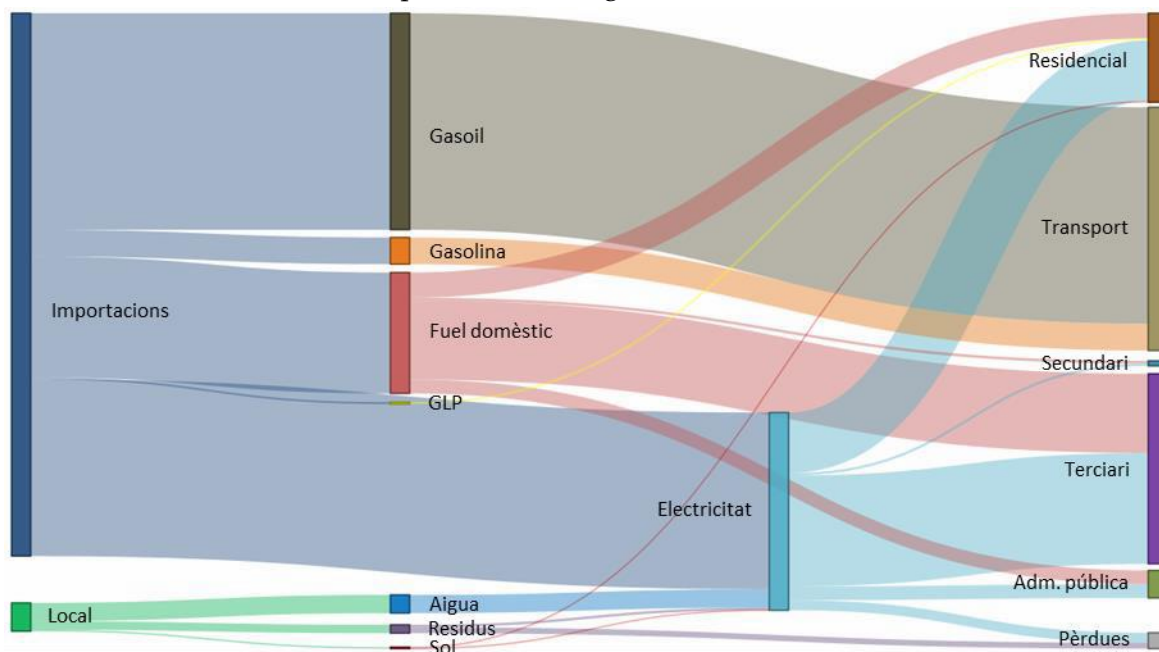


Fig. 4.5. Sistema energètic en l'escenari de referència l'any 2050. Infografia: Bruce McPherson

4.2.2 Escenari Eficient

Tal com es descriu en el Capítol 2 Secció 2.7.3 l'escenari Eficient integra una bateria de mesures d'estalvi d'energia i emissions de CO₂. El diagrama de la Fig. 4.6 representa el sistema energètic en aquest escenari l'any 2050. Les diferències principals respecte l'escenari Referència són la introducció d'importacions dels pèl·lets per abastir el sector residencial i terciari, l'increment de l'ús del sol com a font d'energia i ús de l'electricitat en el sector del transport, a més d'una reducció significativa en l'ús d'energia final.

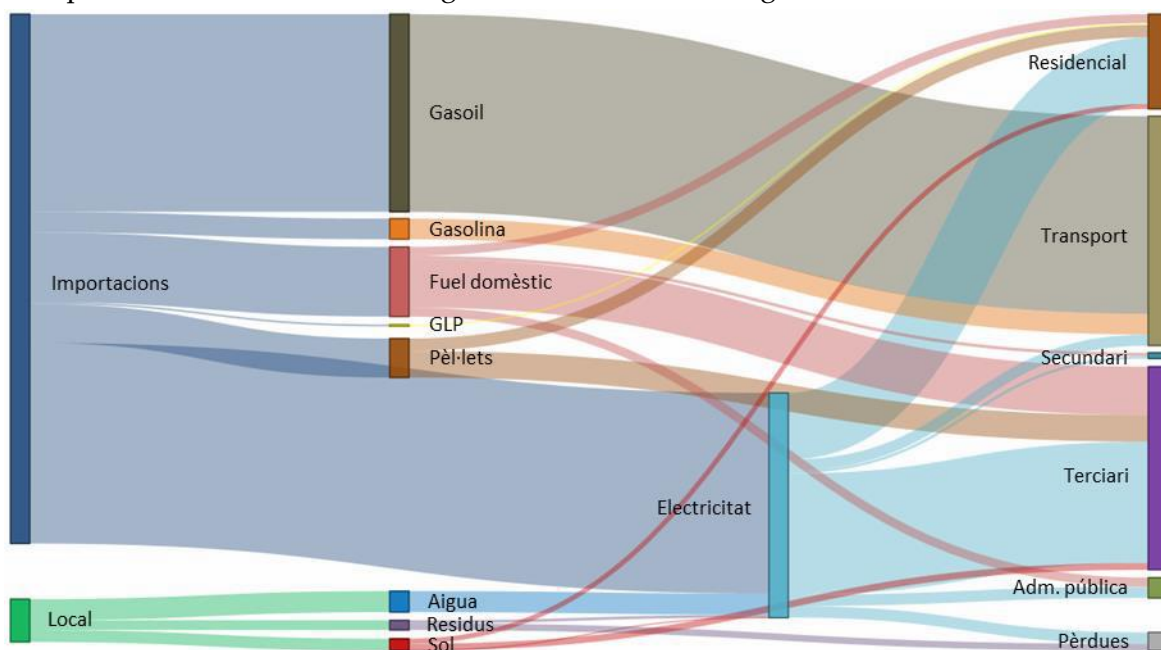


Fig. 4.6. Sistema energètic en l'escenari Eficient l'any 2050. Infografia: Bruce McPherson

4.2.3 Escenari Llibre Blanc

L'escenari Llibre Blanc, descrit en detall al Capítol 3 Secció 3.4.3, parteix de l'escenari Eficient però introdueix nova capacitat hidroelèctrica, solar fotovoltaica, eòlica i de cogeneració. D'aquesta manera, com s'observa en la Fig. 4.7, s'incrementa l'aportació local de fonts d'energia, s'importa GNL i apareix la calor com a nova font secundària d'energia per abastir el sector terciari i l'administració pública.

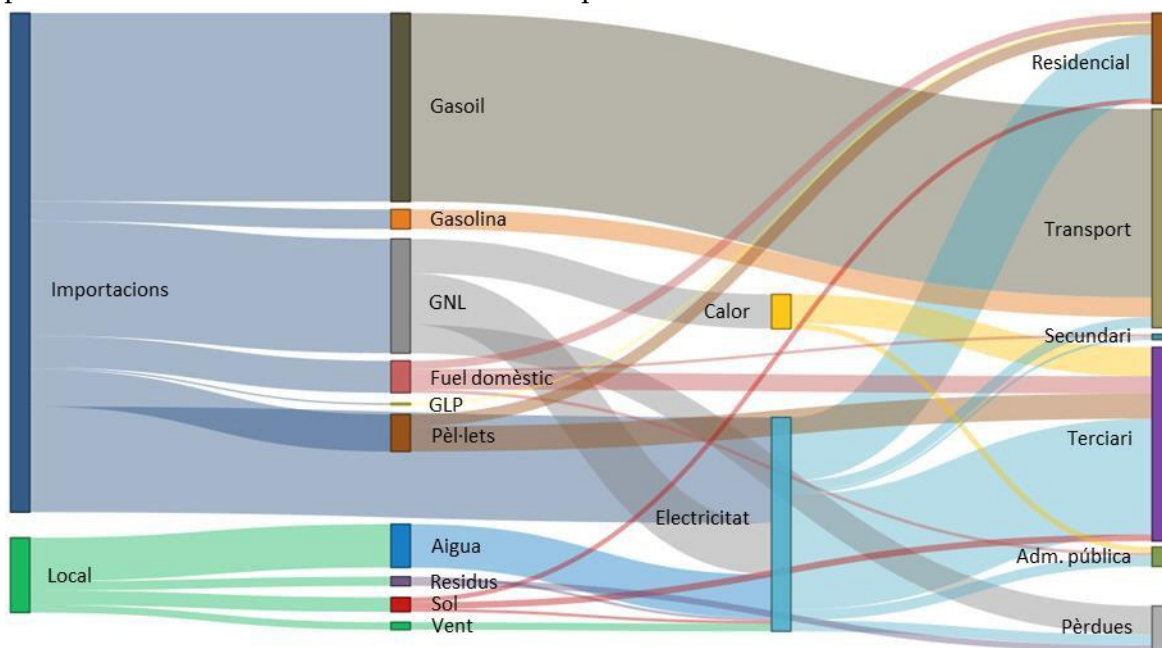


Fig. 4.7. Sistema energètic en l'escenari Llibre Blanc l'any 2050. Infografia: Bruce McPherson

4.2.4 Escenari Òptim

En l'escenari Òptim, l'estructura general del sistema l'any 2050 (veure Fig. 4.8) és similar a la de l'escenari Llibre Blanc però amb una major contribució d'energia solar fotovoltaica i eòlica que permet reduir les importacions d'electricitat. A més, a diferència de l'escenari Llibre Blanc, a l'any de finalització del model es manté la cogeneració mitjançant biomassa local.

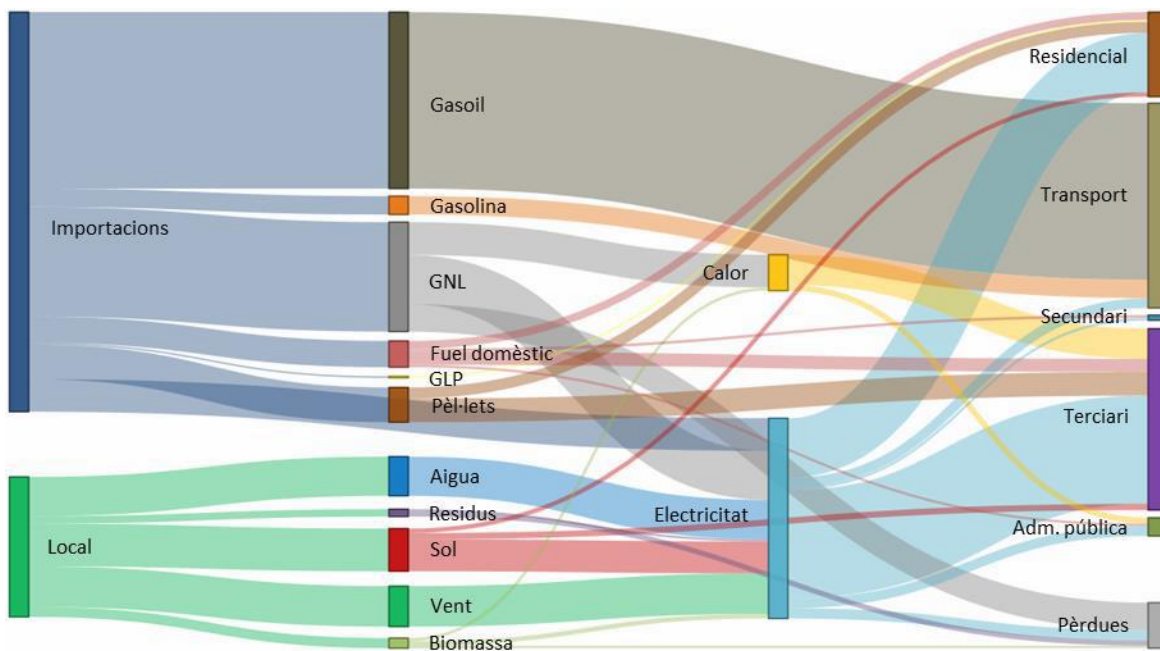


Fig. 4.8. Sistema energètic en l'escenari Òptim l'any 2050. Infografia: Bruce McPherson

4.2.5 Escenari Òptim amb límit de CO₂

La Fig. 4.9 presenta el sistema energètic de l'escenari Òptim amb límit de CO₂. La diferència més destacable respecte l'escenari Òptim és la menor importació de GNL. Per compensar-ho cal importar més fuel domèstic i més electricitat de França. La substitució d'electricitat provinent de cogeneració amb GNL per electricitat importada fa que hi hagi menys pèrdues en el sistema ja que aquestes s'externalitzen al sector elèctric d'origen.

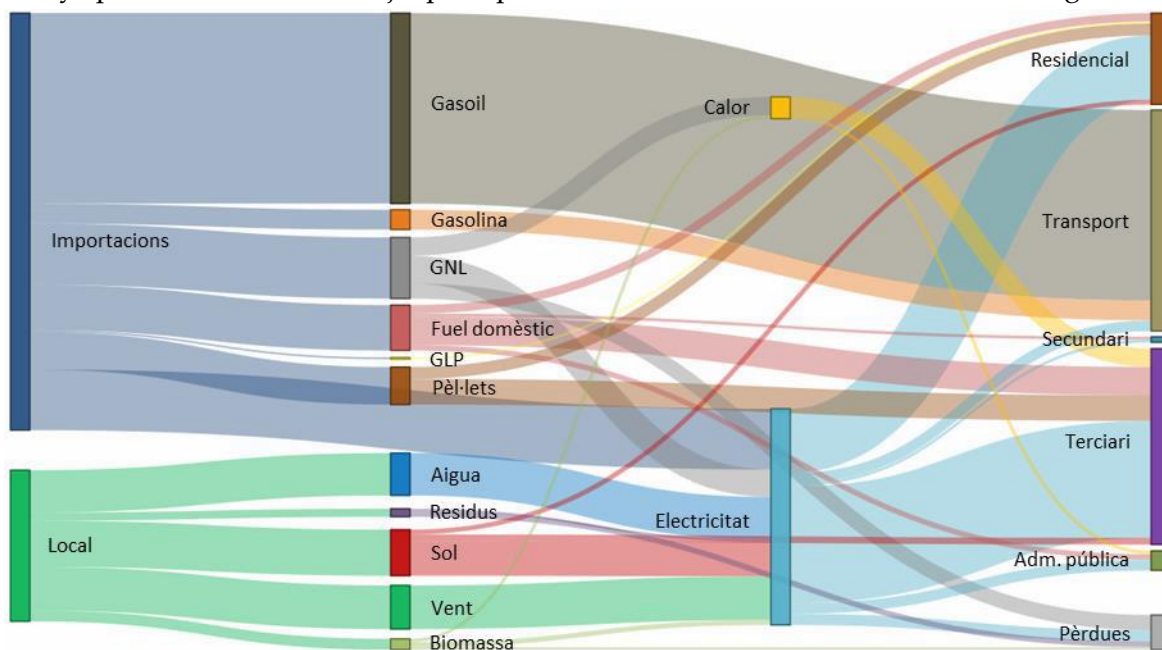


Fig. 4.9. Sistema energètic en l'escenari Òptim amb límit de CO₂ l'any 2050. Infografia: Bruce McPherson

4.3 Resultats

Aquesta secció presenta els resultats d'analitzar la seguretat energètica en els escenaris del model LEAP-Andorra mitjançant els indicadors presentats en la Taula 4.1. En el present document s'exposen i es comenten els principals resultats obtinguts. En la web <http://www.obsa.ad/leapandorra> es publiquen la totalitat dels resultats, conjuntament amb els obtinguts en l'àmbit de l'abastiment i demanda d'energia així com les principals variables exògenes del model.

4.3.1 Sobirania

En l'escenari de referència es mantenen els alts nivells actuals de dependència del total de les importacions d'energia. Si ens centrem únicament en les importacions d'electricitat, la dependència inclús s'accentua arribant a un 89% l'any 2050. Tal com s'observa en la Fig. 4.10, únicament en els escenaris on s'actua conjuntament sobre l'abastiment i el consum d'energia (Llibre Blanc, Òptim i Òptim amb límit de CO₂) s'aconsegueixen reduccions significatives en aquests indicadors. Tot i que la dependència de les importacions d'electricitat es redueix considerablement en els tres escenaris d'abastiment, aquesta millora s'aprecia en menor mesura en els resultats obtinguts en la dependència del total d'energia. Aquest fet s'explica perquè els principals sectors d'activitat del país mantenen una alta dependència als combustibles fòssils malgrat la tendència general cap a l'electrificació.

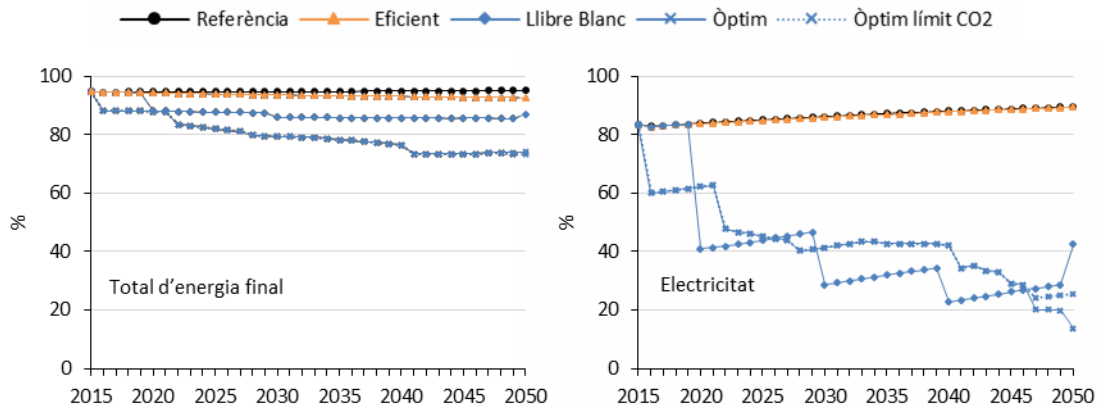


Fig. 4.10. Dependència de les importacions d'energia

La Fig. 4.11 mostra el cost de les importacions d'energia com a percentatge del total del PIB del país. És destacable la tendència creixent en tots els escenaris arribant a duplicar-se en el cas de l'escenari Referència. Únicament en els escenaris òptims s'aconsegueix establir aquest valor al voltant del 7%. Aquests resultats són fruit principalment de tres factors: (1) la previsió de creixement moderat del PIB en els propers anys, (2) l'increment accentuat previst dels preus de les importacions i (3) la dependència dels combustibles fòssils en tots els escenaris.

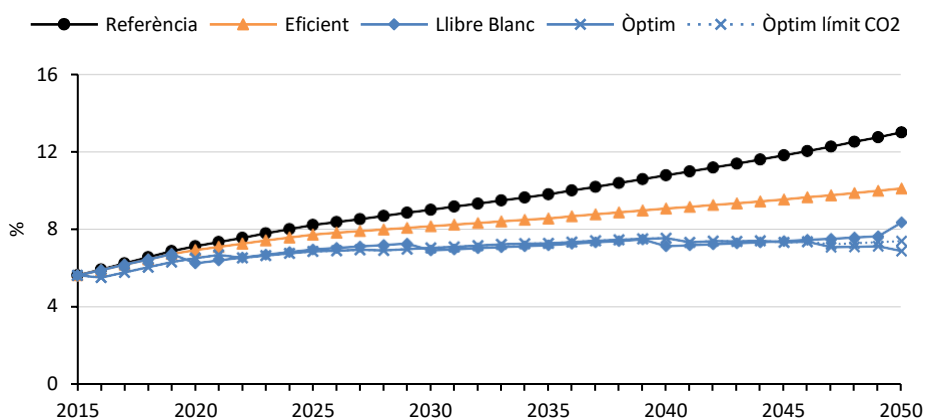


Fig. 4.11. Cost de les importacions d'energia en relació amb el PIB

L'any base del model, la generació elèctrica d'Andorra no depèn d'importacions ja que es basa únicament en energia hidroelèctrica, solar i crema de residus locals. L'entrada de centrals de cogeneració amb GNL canvia aquesta situació aportant beneficis però també introduint una nova vulnerabilitat al sistema energètic. Conjuntament amb les centrals de cogeneració amb biomassa, introdueixen la calor com a nova font d'energia secundària. La Fig. 4.12 mostra la dependència de l'electricitat i la calor a les importacions d'energia. Ambdós indicadors estan molt condicionats per la capacitat instal·lada de cogeneració amb GNL ja que el potencial de generació amb biomassa local és limitat (Govern d'Andorra, 2012). En aquest sentit, l'escenari Llibre Blanc és el més vulnerable ja que aposta per incrementar considerablement la potència instal·lada de CHP amb GNL a curt termini. El potencial limitat de la cogeneració amb biomassa local provoca que la calor sigui altament dependent de les importacions en tots els escenaris.

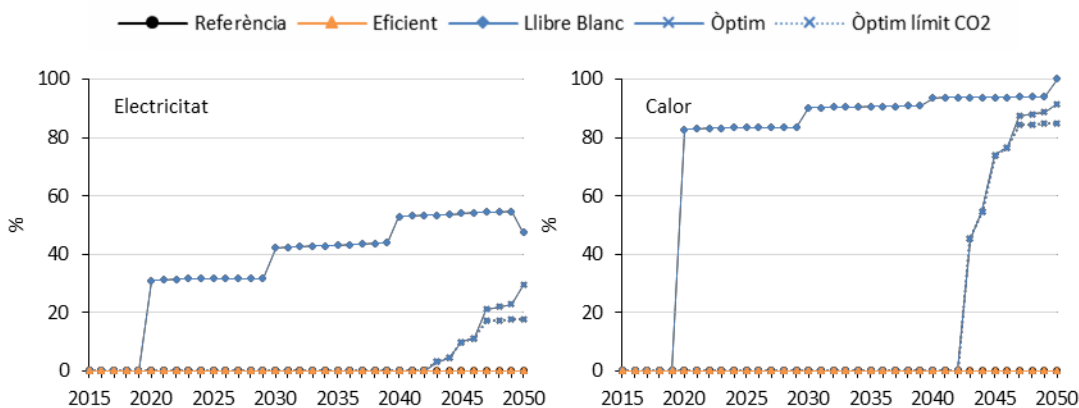


Fig. 4.12. Dependència de les energies secundàries a les importacions d'energia

Tal com es comenta prèviament, tot i que en diferent proporció segons els escenaris, els principals sectors d'activitat del país mantenen una alta dependència als combustibles fòssils. Aquest fet és especialment crític en el sector del transport (veure Fig. 4.13). Malgrat que en tots els escenaris, excepte en el Referència, l'any 2050 el 50% de l'estoc dels turismes passen a ser elèctrics, la disminució de la dependència d'aquest sector a les importacions d'energia és gairebé insignificant. El principal motiu darrere aquest fet és l'important pes del *fuel tourism* en el sector. Mentre el consum del parc de turismes disminueix en tots els escenaris, el *fuel tourism* es manté constant dificultant que s'assoleixin millores significatives en la sobirania del sector del transport. La millor eficiència dels vehicles elèctrics respecte els convencionals fa que tot i haver el mateix estoc de turismes d'ambdós tecnologies l'any 2050, el seu consum respecte el total d'energia sigui poc significatiu i per tant menys apreciables les millores en dependència aportades.

En la resta de sectors les perspectives són més positives preveient-se una disminució considerable de la vulnerabilitat a possibles alteracions en l'abastiment d'energia en tots els escenaris alternatius. Com es pot observar en la Fig. 4.13, en l'escenari Òptim, la dependència del sector residencial a les importacions es situa per sota del 40% l'any 2050 gràcies a l'increment en la generació elèctrica local, la tendència de substitució de fuel domèstic per electricitat en calefacció i la introducció d'energia solar en l'ACS.

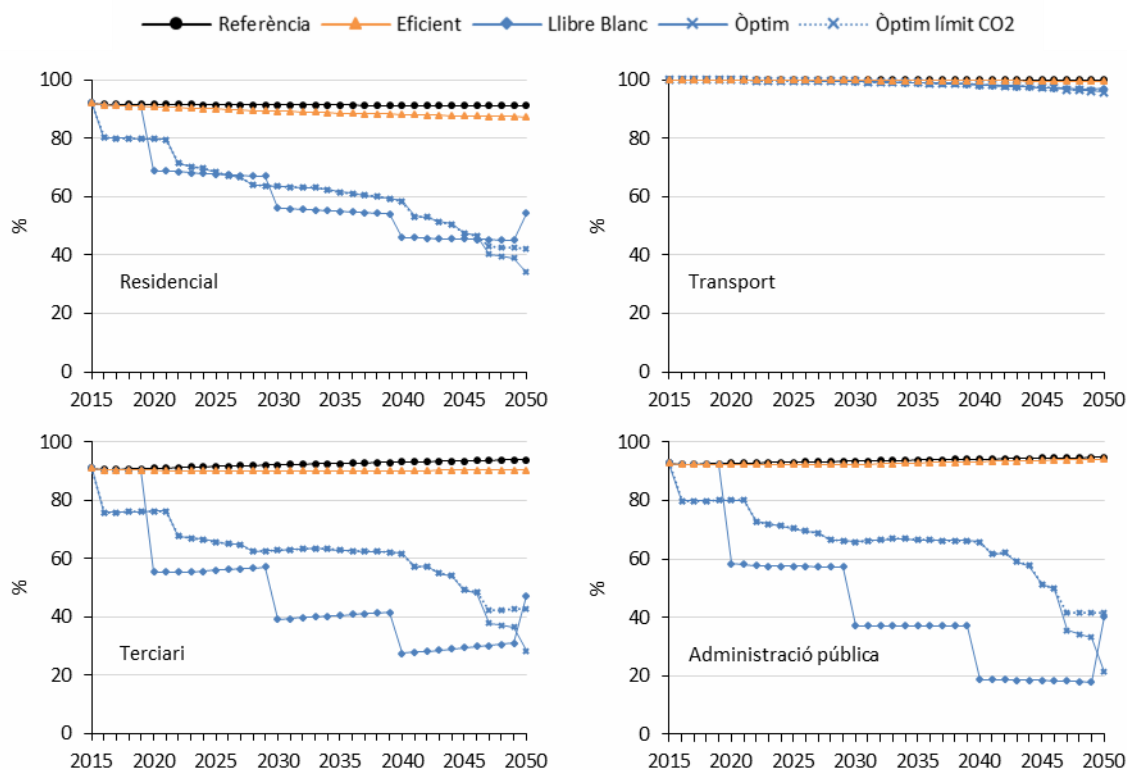


Fig. 4.13. Dependència dels sectors consumidors d'energia final a les importacions d'energia

En el sector terciari i l'administració pública s'esperen avenços inclús més significatius (veure Fig. 4.13) gràcies a la introducció de la calor en l'àmbit de la calefacció provinent de les noves centrals de cogeneració. L'aposta per la cogeneració amb GNL en l'escenari Llibre Blanc provoca una forta millora de l'indicador en aquests sectors.

4.3.2 Robustesa

Com s'ha explicat prèviament en el Capítol 1 Secció 1.1.4, l'estudi de la robustesa del sistema energètic es centra principalment en la suficiència de recursos i en la fiabilitat de la infraestructura disponible. Pel que fa a infraestructura, el particular sector energètic d'Andorra fa que aquesta sigui gairebé en la seva totalitat elèctrica. Per aquest motiu, l'anàlisi de la robustesa es focalitza en gran part en el sector elèctric.

L'escala mensual amb la que s'ha implementat el sector elèctric del model LEAP-Andorra és insuficient per l'anàlisi de les vulnerabilitats en termes de robustesa. Per aquest motiu es modelitzen les corbes de consum elèctric horari dels escenaris Referència i Eficient a partir de les sortides del model LEAP-Andorra i l'eina desenvolupada per Travesset-Baro (2012).

La Fig. 4.14 mostra les corbes de consum horàries d'un dia feiner del mes de gener, on generalment s'assoleixen els valors màxims anuals de consum. Comparant els resultats del model amb les dades de l'any 2014, s'observa com els consums nocturns queden infravalorats. De totes maneres, el pic diari s'ajusta molt a les dades reals pel que pot representar una eina útil per estimar els futurs pics de consums horaris.

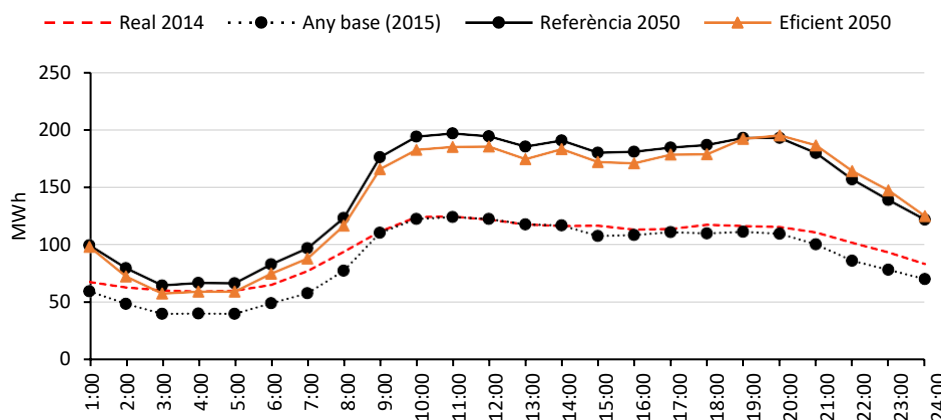


Fig. 4.14. Corbes de consum horàries d'un dia feiner del mes de gener

Tal com s'observa en la Fig. 4.14, el valor dels pics màxims de consum són similars en l'escenari Referència i Eficient tot i que en el primer cas es dona al matí (11:00) i en el segon a la tarda (20:00). Aquest desplaçament de la corba en l'escenari Eficient és degut a les recàrregues dels vehicles elèctrics al finalitzar la jornada laboral (Morrow et al., 2008). La Fig. 4.14 no mostra les corbes de consum de la resta d'escenaris ja que en termes de demanda elèctrica són equivalents a l'escenari Eficient.

La fiabilitat en la generació d'electricitat es mesura en aquest estudi a través de la capacitat disponible. L'indicador mostrat en la Fig. 4.15 representa la capacitat elèctrica instal·lada respecte el pic de consum. Com es pot observar, gairebé fins l'any 2030, el pic de consum en tots els escenaris és superior a la capacitat instal·lada (valors de l'indicador inferiors al 100%). Aquest és un fet poc habitual en la majoria de països europeus però la tònica d'Andorra des de l'any 1973 on passa de ser país exportador d'electricitat a importador (Bricall, 2001). En els dos escenaris d'optimització es supera aquest llindar a partir de l'any 2028, assolint en ambdós casos un valor màxim del 158% l'any 2041. A partir de l'any 2046 aquest indicador empitjora en l'escenari que imposa un límit en les emissions de CO₂ ja que restringeix la capacitat instal·lada de CHP amb GNL als 21,5 MW a canvi d'importar més electricitat francesa.

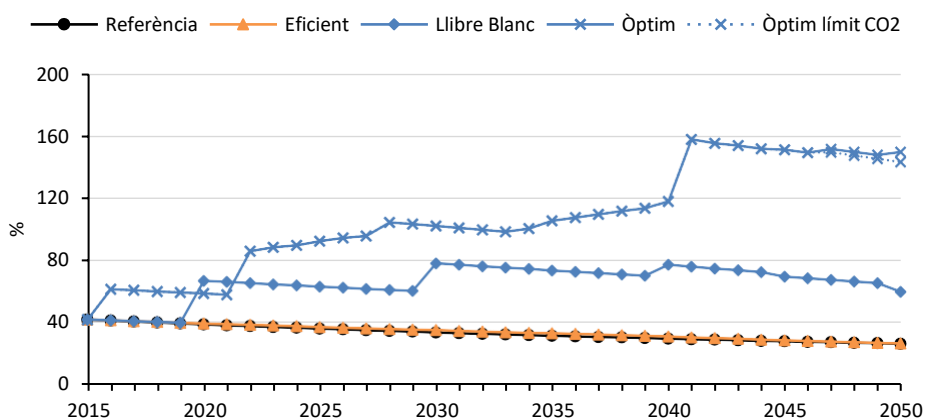


Fig. 4.15. Capacitat elèctrica instal·lada respecte el pic de consum

L'alt nivell de dependència del sistema energètic andorrà a les importacions d'electricitat (veure Fig. 4.10) obliga a disposar d'una capacitat d'importació que permeti garantir la fiabilitat en el subministrament elèctric. L'indicador de la Fig. 4.16 mostra el percentatge de saturació de les línies d'importació representat com el pic de consum elèctric en funció de la capacitat d'importació.

L'any 2015 va entrar en servei la nova línia de 225 kV que uneix l'Ospitalet i l'estació transformadora i repartidora (ETR) de Grau Roig. Amb aquesta ampliació, aquest indicador millora significativament assolint valors inferiors al 40%. El model LEAP-Andorra considera que la capacitat actual romandrà constant en els propers anys. Com es pot observar en la Fig. 4.16, els valors d'aquest indicador augmenten en tots els escenaris a mesura que incrementa el pic de consum elèctric assolint valors propers al 60% l'any 2050.

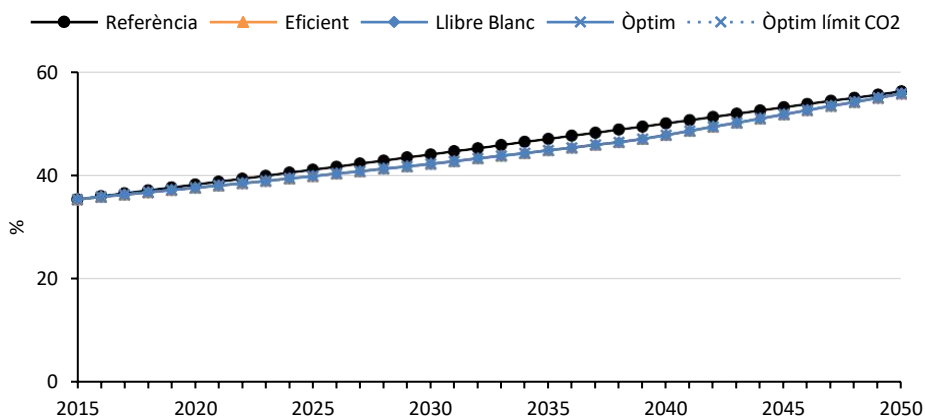


Fig. 4.16. Pic de consum elèctric respecte la capacitat d'importació

El creixement anual en l'ús d'energia és un indicador representatiu de la pressió provocada sobre el sistema energètic. La Fig. 4.17 mostra el creixement en l'ús d'energia primària. S'observa un creixement continuat en els escenaris Referència i Eficient, tot i que més moderat en aquest últim. En els escenaris d'optimització, la introducció de nova infraestructura de generació elèctrica provoca pics de reducció en l'ús d'energia primària. Això evidencia que la nova generació elèctrica inclosa en el sistema és més eficient que la dels països veïns. Si ens centrem en l'ús d'electricitat, s'aprecia un creixement continuat fins l'any 2050 comprés entre un 1,2% i un 1,9% anual en l'escenari Referència i més moderat en la resta d'escenaris (1,2%-1,6%).

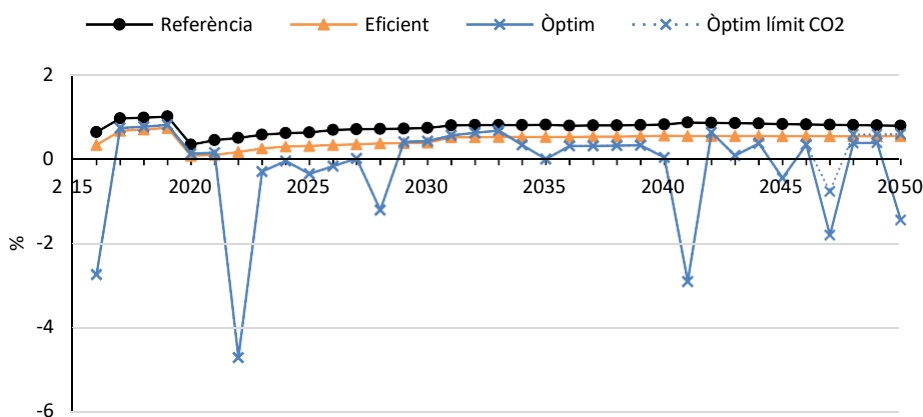


Fig. 4.17. Creixement anual en l'ús d'energia primària³⁹

Com s'observa en la Fig. 4.18, l'ús de combustibles fòssils decreix de forma continuada a curt i mitjà termini excepte en l'escenari Referència. En els escenaris d'optimització, a partir de l'any 2043 es donen pics de creixement deguts a la incorporació de les centrals de cogeneració amb GNL. Observant en paral·lel la Fig. 4.17 s'aprecia com aquests pics estan associats a la reducció d'ús d'energia primària.

Els recursos renovables mostren un creixement continuat anual en tots els escenaris (veure Fig. 4.18) i molt especialment en els que s'incrementa la generació elèctrica local. Igual que succeeix en el cas de les centrals de cogeneració, els pics de creixement de recursos renovables s'associen a pics de reducció de l'ús d'energia primària.

³⁹ S'ha exclòs l'escenari Llibre Blanc per millorar la visualització

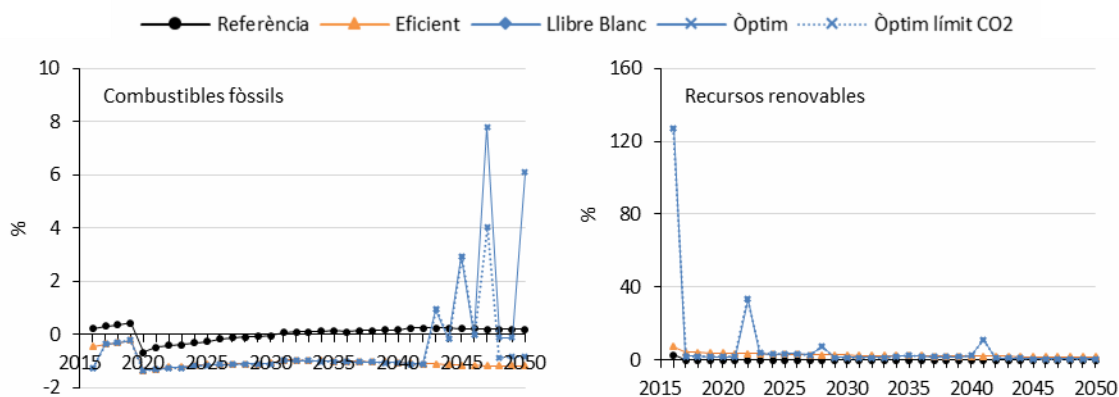


Fig. 4.18. Creixement anual en l'ús de combustibles fòssils i recursos renovables

Centrant-se en els diferents sectors d'activitat, és destacable el creixement continuat d'ús d'energia final en el sector residencial. Com s'observa en la Fig. 4.19, aquest creixement es dona inclús en els escenaris on s'apliquen mesures d'eficiència energètica. Aquest fet és degut a que bona part de les mesures considerades en el sector residencial consisteixen en transitar cap a fonts d'energia renovables (p.ex. introducció solar tèrmica i calderes de biomassa). En el sector del transport es produeix un creixement continuat fins l'any 2019 degut a l'increment del pes del *fuel tourism* associat al turisme (veure projecció de visitants en Fig. 2.5). A partir d'aquest moment es produeix una reducció del consum d'aquest sector incentivada per la tendència de millora d'eficiència dels vehicles en els últims anys. L'escenari Referència es manté en valors negatius fins l'any 2038 mentre que les mesures d'estalvi i eficiència introduïdes en la resta d'escenaris permeten establir-se en una reducció del consum propera al 0,7% anual.

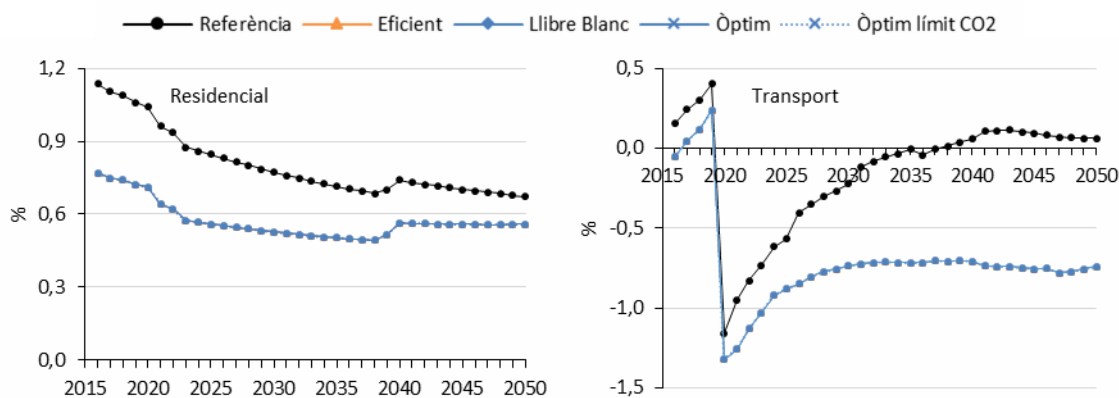


Fig. 4.19. Creixement anual en l'ús d'energia en el sector residencial i el transport

4.3.3 Resiliència

La Fig. 4.20 mostra com la intensitat energètica decreix en tots els escenaris futurs i revela que aquesta ho fa en major mesura en els escenaris en que es fomenta la generació elèctrica local. Aquesta davallada en la intensitat representa una millora en seguretat energètica ja que l'economia es torna menys sensible a fluctuacions en els preus de l'energia. La petita desviació observada els últims anys estudiats entre els dos escenaris d'optimització es deguda a que en l'escenari Òptim s'aposta per una tecnologia més eficient com és la cogeneració amb GNL, en detriment de la importació d'electricitat francesa.

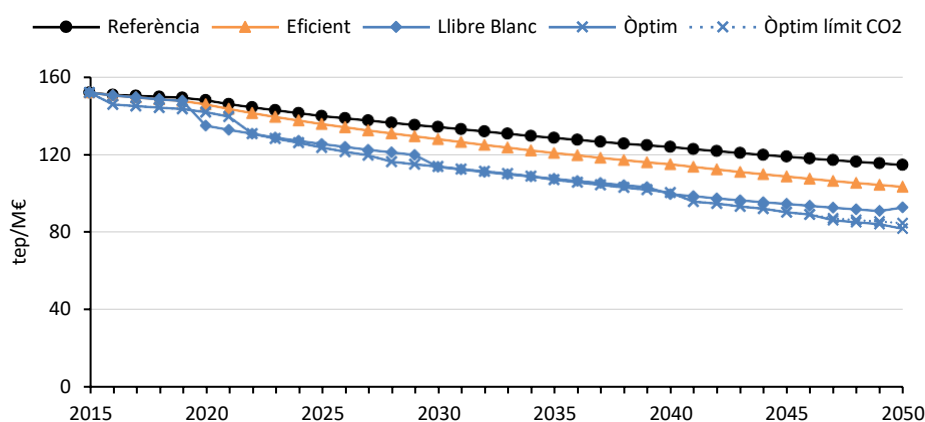


Fig. 4.20. Intensitat energètica en els diferents escenaris del model LEAP-Andorra

La diversitat de fonts primàries d'energia, com la resta d'indicadors de diversitat, es calcula a través de l'índex de diversitat de Shannon-Wiener (veure Eq. 4.1).

$$SWDI = - \sum_i \rho_i \cdot \ln \rho_i \quad (4.1)$$

on ρ_i representa el pes de cada espècie en el mix energètic

Tal com mostra la Fig. 4.21, segueix una tendència creixent en tots els escenaris i més accentuada en els escenaris on s'incrementa la generació autòctona. El valor inicial en l'any base del model (1,1) és inferior als calculats a Europa, Estats Units i Índia per Jewell et al. (2013). Aquest nivell de diversitat s'explica per la baixa disponibilitat de fonts energètiques i perquè el petroli representa el 60% de l'energia primària del país. La davallada soferta l'any 2016 en els dos escenaris d'optimització es deguda a que aquests escenaris prescindeixen de l'electricitat espanyola. Val a dir que en el model s'han considerat l'electricitat provinent de França i d'Espanya com a dos espècies diferents. A llarg termini

però, la introducció de noves espècies (fonts d'energia) i la distribució més equilibrada d'aquestes permet situar el valor d'aquest indicador per sobre d'1,6 en l'escenari Llibre Blanc i en els òptims.

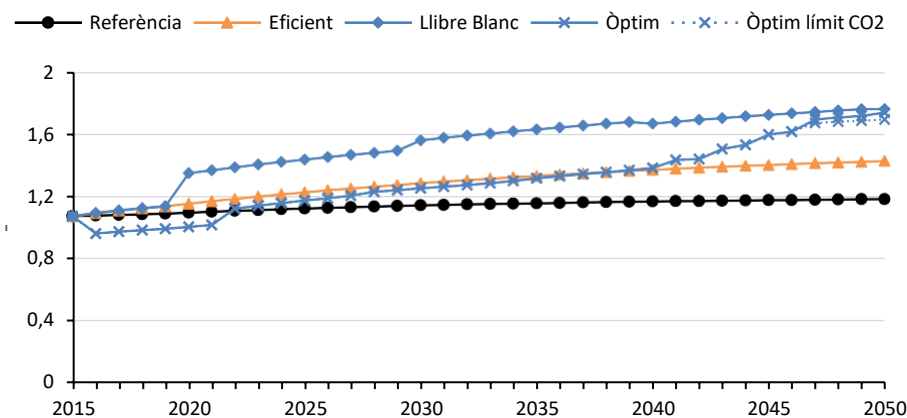


Fig. 4.21. Diversitat de fonts primàries d'energia (índex de diversitat de Shannon-Wiener)

L'evolució de la diversitat en l'electricitat (veure Fig. 4.22) segueix la tendència de la diversitat de fonts primàries d'energia. En aquest cas però, l'increment de la demanda elèctrica i l'absència d'incorporació de noves tecnologies de generació en els escenaris Referència i Eficient provoca un empitjorament d'aquest indicador a llarg termini en ambdós casos. Per contra, la resta d'escenaris incrementen la diversitat a mesura que augmenta l'aportació d'electricitat de noves fonts de generació elèctrica en el sistema energètic. En aquest cas, l'any 2016, tot i introduir nova capacitat hidroelèctrica i de cogeneració amb biomassa, s'aprecia encara amb més claredat la davallada en els escenaris òptims deguda a la decisió d'importar electricitat únicament de França. En ambdós escenaris els valors de diversitat es mantenen per sota dels de l'escenari Referència fins l'any 2022, moment en el qual la incorporació de 39 MW de generació eòlica millora considerablement aquest indicador. A més de la diversitat en l'electricitat, la Fig. 4.22 mostra la diversitat en la calor generada. Aquesta font secundària d'energia s'incorpora al sistema energètic andorrà a través de les centrals de cogeneració. En l'escenari Llibre Blanc, l'any 2020 s'assoleix un valor de 0,45 el qual cau sobtadament l'any 2030, 2040 i 2050 a mesura que s'incrementa la generació amb GNL i en conseqüència també el desequilibri entre aquesta i la calor generada mitjançant cogeneració amb biomassa. En els escenaris òptims aquest indicador es manté a zero i no assoleix valors positius fins l'any en que s'incorpora la cogeneració amb GNL (2043). Fins aquest moment tota la calor es generada amb la mateixa font primària i per tant el valor de diversitat es manté a zero. L'any 2050, el millor

valor en aquest indicador es dona en l'escenari Òptim amb límit de CO₂ ja que existeix un major equilibri en la generació entre les dos tecnologies que aporten calor al sistema.

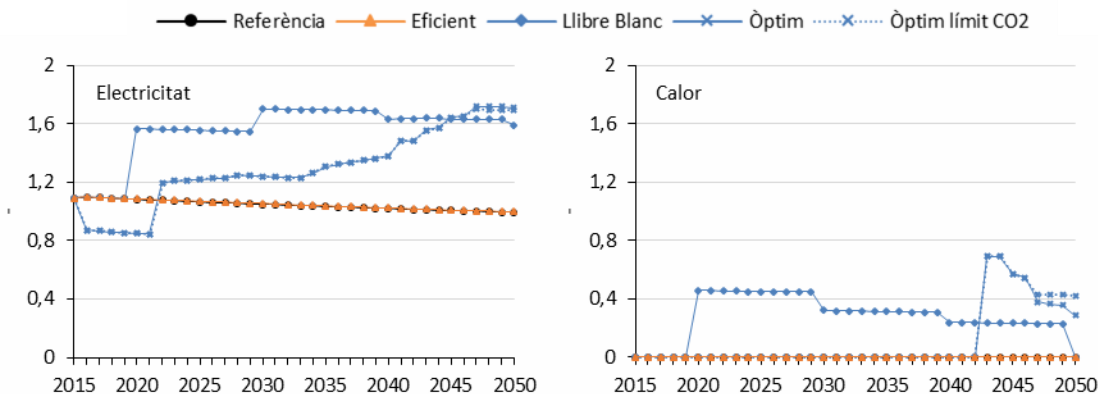


Fig. 4.22. Diversitat de fonts d'energia en les energies secundàries consumides (índex de diversitat de Shannon-Wiener)

La diversitat d'energia en els sectors d'energia final mostra dues tendències diferenciades segons si es tracta de l'escenari Referència o de la resta d'escenaris on s'apliquen mesures d'estalvi i eficiència energètica. En tots els sectors a excepció del transport, l'escenari Referència es manté durant el període analitzat en valors propers a 0,7 (veure Fig. 4.23). Aquests valors baixos de diversitat són deguts a que en l'inici del model només s'utilitzen dos fonts d'energia (electricitat i petroli). Els sectors residencial i el terciari milloren la diversitat en la resta d'escenaris gràcies a la introducció de biomassa i energia solar tot i que en el cas del sector residencial s'observa un petit declivi a partir de l'any 2039 provocat pel desequilibri de pes entre les diferents fonts (fort increment de l'electricitat en detriment del petroli).

Menció especial requereix el sector del transport amb valors de diversitat en l'escenari Referència molt propers a zero durant tot el període estudiat. La resta d'escenaris, on la introducció de vehicles elèctrics és molt més important, incrementen la diversitat però sense superar en cap moment un valor de 0,2. Tot i que disposar d'un 50% de l'estoc de turismes elèctrics l'any 2050 podria portar a pensar que la diversitat del sector del transport seria més gran, cal assenyalar que aquests representen únicament un 5% del consum d'energia primària associada al transport i per tant el desequilibri entre electricitat i petroli en aquest sector segueix essent molt important.

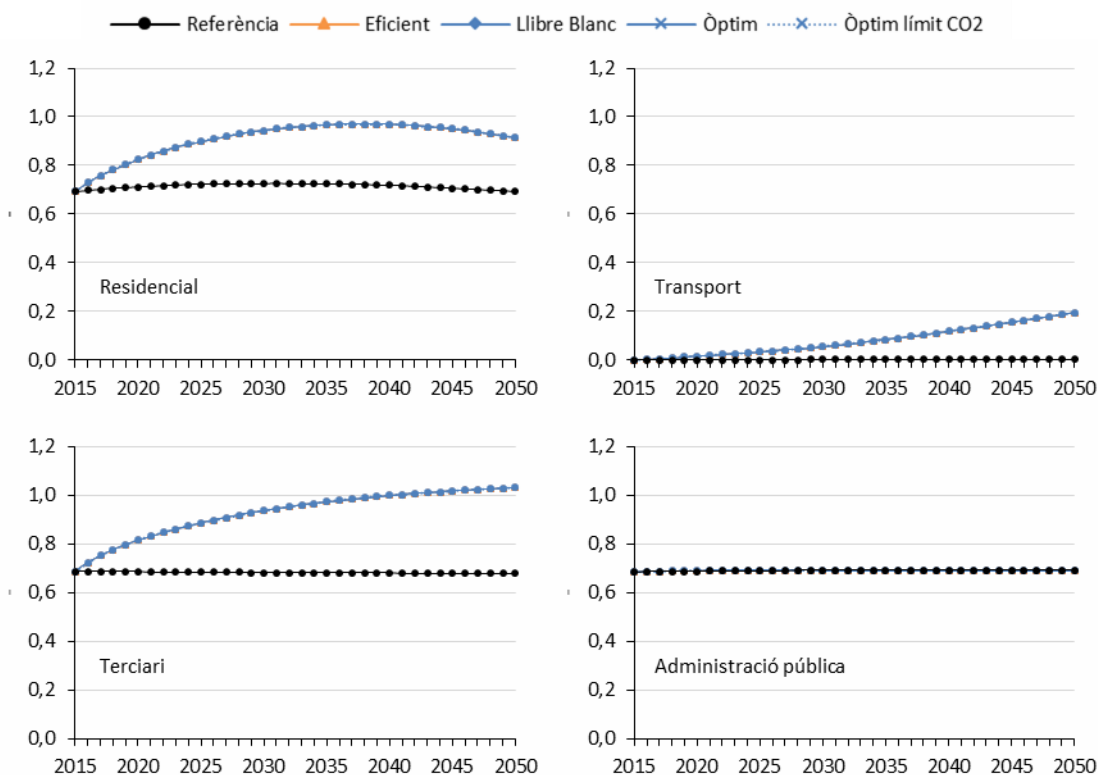


Fig. 4.23. Diversitat de fonts d'energia en els sectors consumidors d'energia final (índex de diversitat de Shannon-Wiener)

4.4 Discussió

En absència d'introducció de noves polítiques, l'evolució de la seguretat energètica en l'escenari Referència segueix una tendència negativa en gairebé tots els indicadors. S'incrementa encara més la vulnerabilitat del sistema energètic en àmbits actualment ja molt crítics com la dependència a les importacions o el creixement en l'ús de combustibles fòssils i es perpetuen problemes com la baixa diversitat de fonts d'energia en el sector del transport. Bona part de les tendències negatives observades en l'escenari Referència es reverteixen en els escenaris de reducció d'emissions de CO₂ (Eficient, Llibre Blanc, Òptim i Òptim amb límit de CO₂). Les millores més accentuades en seguretat energètica s'obtenen en els escenaris òptims i especialment en el que no inclou límit a les emissions de CO₂.

En línies generals, tal com mostra la Fig. 4.24, s'observa una associació positiva entre la reducció d'emissions de CO₂ i la reducció de dependència energètica tot i que l'última dècada dels escenaris Llibre Blanc i Òptim trenca aquesta tendència. En el primer cas

l'increment en dependència és degut a que les centrals de cogeneració de GNL i biomassa introduïdes l'any 2020 arriben al final del seu cicle de vida l'any 2050 i no són reemplaçades. En l'escenari Òptim, l'increment d'emissions en l'última dècada és degut a la creixent utilització de GNL en les centrals de cogeneració.

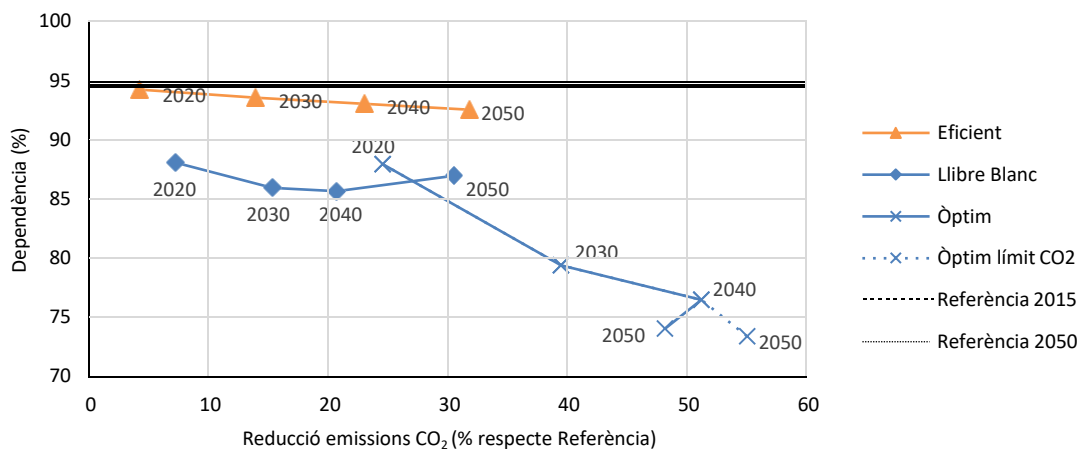


Fig. 4.24. Dependència de les importacions d'energia i reducció d'emissions de CO₂ en els diferents escenaris

Una característica comuna en tots els escenaris resultants és la persistent dependència dels combustibles fòssils. La Fig. 4.25 mostra el pes dels combustibles fòssils respecte el total d'energia primària els anys 2030 i 2050 en els escenaris amb major introducció d'energies renovables. S'observa que tot i la introducció d'un bon nombre de mesures tant en la demanda com en l'abastiment d'energia, la dependència del petroli i el gas natural segueix essent molt important. En el millor dels casos (escenari Òptim amb límit de CO₂) la dependència l'any 2050 és del 50%⁴⁰. Aquest fet mostra la dificultat per prescindir dels combustibles fòssils i el risc elevat del sistema energètic en un context d'escassetat de recursos fòssils. En aquest punt, torna a ser determinant el pes del *fuel tourism* i l'absència de mesures planificades per abordar-lo.

⁴⁰ Cal assenyalar que aquest valor encara seria major si comptabilitzéssim els combustibles fòssils associats a l'electricitat francesa

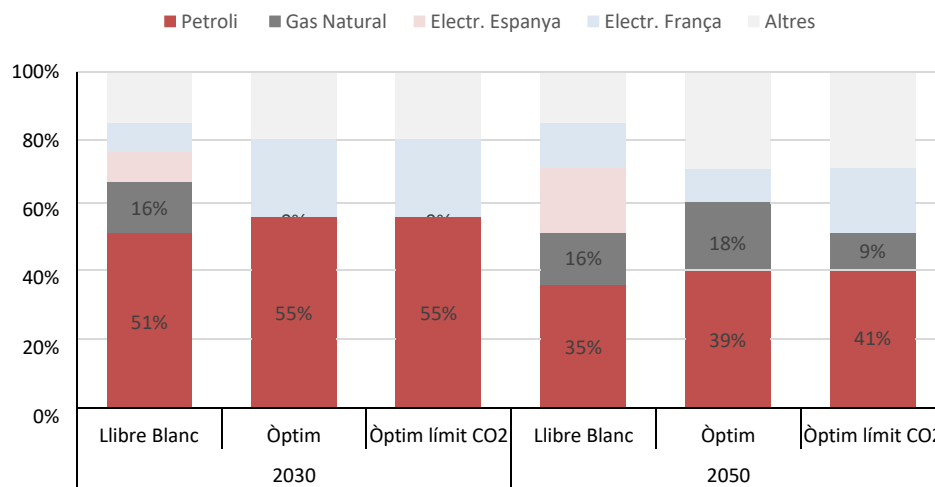


Fig. 4.25. Combustibles fòssils respecte el total d'energia primària els anys 2030 i 2050

Les centrals de cogeneració redueixen la dependència de les importacions d'electricitat i fuel domèstic i incrementen la diversitat de fonts d'energia introduint el GNL i la biomassa en el sistema energètic. Per contra, inclouen un nou risc en el sistema ja que la calor generada té una dependència de les importacions molt elevada i una diversitat molt baixa ja que depèn pràcticament en exclusiva del GNL.

En tots els escenaris analitzats, la saturació de les línies d'importació (veure Fig. 4.16) augmenta gairebé fins al 60%. El risc d'aquest creixement és relatiu ja que cal analitzar-lo en paral·lel a l'indicador de dependència de les importacions d'electricitat. És a dir, a mesura que disminueix la dependència de les importacions elèctriques, menor importància té la saturació de les línies d'importació. Un bon exemple el trobem en l'escenari Òptim, on l'any 2050 es redueix la dependència de les importacions d'electricitat a menys del 20%. En aquest context, no representa un risc destacable que el valor de saturació de les línies d'importació s'apropi al 60%.

En els escenaris òptims, la diversitat es veu molt minvada el primer any del model per la decisió d'importar únicament electricitat francesa i es manté per sota dels valors de l'escenari Referència fins l'any 2022 on s'introdueixen 38,6 MW de capacitat eòlica. La diversitat millora a mig i llarg termini fins assolir valors equivalents als observats en l'escenari Llibre Blanc. Aquests resultats mostren com importar únicament electricitat de França incrementa la vulnerabilitat del sistema, almenys fins que aquest compensa aquest risc incrementant la generació elèctrica local. Aquest fet posa de manifest la necessitat que els models d'optimització incloguin criteris de seguretat energètica. La Fig. 4.26 mostra la

diversitat de fonts primàries d'energia en paral·lel a la reducció d'emissions de CO₂ respecte l'escenari Referència. S'hi observa com l'escenari Òptim amb límit de CO₂ assoleix el màxim de reducció d'emissions a costa de reduir una mica la diversitat respecte l'escenari Òptim.

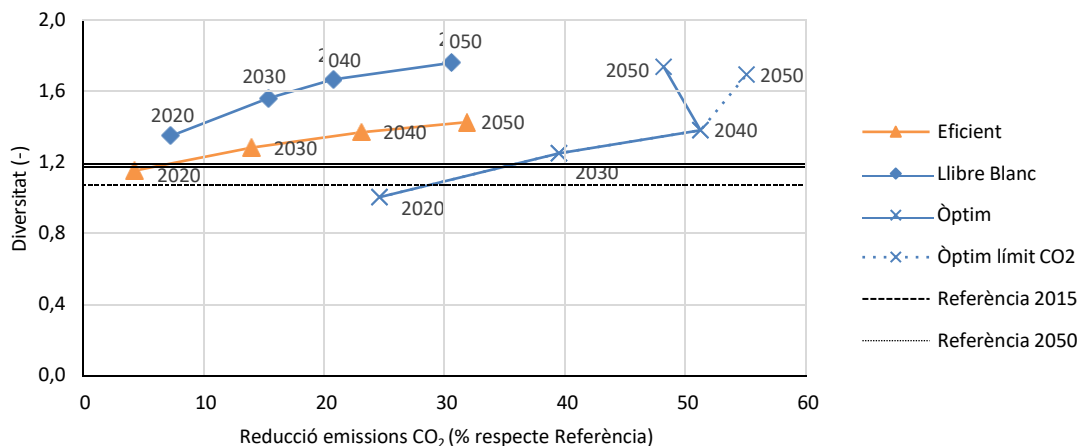


Fig. 4.26. Diversitat de fonts primàries d'energia i reducció d'emissions de CO₂ en els diferents escenaris

L'increment de fonts d'energia (nombre d'espècies) és imprescindible per millorar la diversitat del sistema però de forma individual no sempre és suficient per fer-ho. Això és degut a que la diversitat no és només qüestió de varietat d'espècies sinó també d'equilibri entre elles (Stirling, 2007). L'increment previst de l'ús d'electricitat en el sector residencial representa un risc en la seguretat energètica ja que augmenta el desequilibri entre fonts d'energia i en conseqüència disminueix la diversitat a llarg termini (veure Fig. 4.23). En aquest sentit, és important estudiar la tendència d'aquest indicador en paral·lel amb el de diversitat de fonts d'energia en l'electricitat. La diversitat en el sector del transport és actualment un dels principals problemes en matèria de seguretat energètica no només a Andorra sinó també a escala global (Cherp et al., 2012). Els escenaris analitzats, tot i la introducció massiva de vehicles elèctrics no milloren considerablement aquest aspecte degut al pes del *fuel tourism*, el nombre limitat d'espècies i el desequilibri entre elles. Cenyint-nos al marc de diversitat definit per Stirling (2007), en aquest estudi queda pendent contemplar la tercera perspectiva de la diversitat: la *disparity*, és dir, com són de diferents les espècies. Precisament la no inclusió d'aquesta perspectiva, és una de les debilitats de l'índex de diversitat de Shannon-Wiener.

En línies generals, l'estudi desenvolupat mostra una associació positiva entre reducció d'emissions i millores en seguretat energètica. Aquests resultats estan en la línia dels obtinguts en altres estudis tant d'escala nacional (Glynn et al., 2017; Jewell et al., 2013) com global (Cherp et al., 2016; Jewell et al., 2014). Val a dir que aquesta associació pot trencar-se

motiu pel qual és important seguir analitzant en un futur paral·lelament els escenaris de reducció d'emissions amb l'evolució de la seguretat energètica. En aquest sentit, la incorporació dels indicadors en el model LEAP-Andorra permet tenir sempre present la seguretat energètica en els múltiples possibles escenaris de transició cap a una economia de baixes emissions.

4.5 Referències

- Bricall, J.M., 2001. L'economia andorrana en el canvi de segle. Fundació Julià Reig.
- Cherp, A., Adenikinju, A., Goldthau, Andreas Hernandez, Francisco Hughes, L., Jewell, J., Olshanskaya, M., Jansen, J., Soares, R., Vakulenko, S., 2012. Energy and security, in Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future.
- Cherp, A., Jewell, J., 2011. The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 3, 202–212. doi:10.1016/j.cosust.2011.07.001
- Cherp, A., Jewell, J., Vinichenko, V., Bauer, N., De Cian, E., 2016. Global energy security under different climate policies, GDP growth rates and fossil resource availabilities. *Clim. Change* 136, 83–94. doi:10.1007/s10584-013-0950-x
- Departament d'Estadística, 2017. Consum d'energia final. URL: <http://www.estadistica.ad> (accessed 5.11.17).
- Eurostat, 2017. Eurostat Databse. Your key to European statistics. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (accessed 5.12.17).
- Glynn, J., Chiodi, A., Ó Gallachóir, B., 2017. Energy security assessment methods: Quantifying the security co-benefits of decarbonising the Irish Energy System. *Energy Strateg. Rev.* 15, 72–88. doi:10.1016/j.esr.2016.11.005
- Govern d'Andorra, 2012. Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra.
- Jewell, J., 2011. The IEA Model of Short-term Energy Security (MOSES), Citeseer. Paris.
- Jewell, J., Cherp, A., Riahi, K., 2014. Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices. *Energy Policy* 65, 743–760.
- Jewell, J., Cherp, A., Riahi, K., 2012. Energy security indicators for use in Integrated Assessment Models.

- Jewell, J., Cherp, A., Vinichenko, V., Bauer, N., Kober, T., McCollum, D., Van Vuuren, D.P., Van Der Zwaan, B., 2013. Energy security of China, India, the E.U. and the U.S. under long-term scenarios: results from six IAMs. *Clim. Chang. Econ.* 4, 33. doi:10.1142/S2010007813400113
- Morrow, K., Karner, D., Francfort, J., 2008. Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review. US Department Energy-Vehicle Technol. Progr.
- Stirling, A., 2007. A general framework for analysing diversity in science, technology and society. *J. R. Soc. Interface* 4, 707–719. doi:10.1098/rsif.2007.0213
- Travesset-Baro, O., 2012. Modelització del consum energètic a Andorra. Apunts per a la definició d'un Model Integrat a escala regional. Tesina Final de Màster. Universitat Politècnica de Catalunya

5 CONCLUSIONS. CAP A LA SOSTENIBILITAT DES DE L'ÀMBIT ENERGÈTIC

Aquesta tesi parteix d'un objectiu molt ampli i alhora ambiciós: "Donar suport analític a la definició del model energètic actual i futur d'Andorra, prioritant garantir el subministrament energètic en condicions respectuoses amb la societat, el medi ambient i compatibles amb el desenvolupament econòmic del país". La pròpia naturalesa d'aquest objectiu fa que sigui necessària una major perspectiva per poder-ne valorar el seu assoliment. Tot i que únicament el pas del temps permetrà valorar la contribució d'aquesta tesi en la construcció del futur model energètic andorrà, podem afirmar que almenys s'ha encetat un camí en el desenvolupament de metodologies i eines de modelització i avaluació per ajudar a la presa de decisions. L'adopció del model LEAP-Andorra per part de l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic com a eina de suport a l'anàlisi i disseny de polítiques energètiques nacionals, incrementa la visibilitat i aplicabilitat de les eines desenvolupades i afavoreix el manteniment i futur desenvolupament del model.

Els resultats que deriven de la modelització no s'han d'entendre com una forma de veritat absoluta sinó que han de servir per aportar llum a la definició de futures polítiques a través del rigor científic. La modelització de sistemes energètics és també una eina pedagògica potent ja que permet visualitzar un àmbit molt complex a través de simplificacions, facilitant així la presa de decisions per part de persones, en alguns casos, poc especialitzades en la matèria. A nivell polític però, cal tenir clar l'objectiu real dels models i evitar caure en la temptació d'adaptar-los en busca de justificar decisions preses amb anterioritat.

En l'àmbit andorrà, la modelització de sistemes energètics es troba en una fase incipient i de fet, aquesta tesi representa el tret de sortida d'un àmbit que ha de contribuir a fer front als principals reptes que planteja l'actual situació energètica global: (a) l'esgotament dels combustibles fòssils, (b) la seguretat d'abastiment d'energia i (c) l'escalfament global (Mackay, 2009). El model LEAP-Andorra desenvolupat en aquesta tesi és el primer model de planificació energètica a llarg termini del país. Per poder incrementar la fiabilitat d'aquest model i fomentar el desenvolupament d'altres eines de modelització és necessari que es donin una sèrie d'avenços en el funcionament d'Andorra com a país. Cal millorar processos com la recopilació de dades (especialment en l'àmbit energètic), l'accés a aquestes dades i la col·laboració entre institucions. D'altra banda, seria beneficiós revertir la tendència actual

de basar moltes de les decisions polítiques en estudis no públics. Compartir aquests estudis amb la resta de la societat seria un exercici de transparència i una base per estimular la producció científica.

Bona part dels models integrats existents són a escala global (Costanza et al., 2007) tot i la utilitat dels models regionals per afrontar problemàtiques particulars i facilitar la operativitat en la presa de decisions (Easterling, 1997). Aquesta tesi inclou encara un altre salt d'escala i demostra la validesa de la modelització a una escala local. La principal virtut del model LEAP-Andorra no és la capacitat d'aportar una solució única per encarar els reptes energètics sinó proporcionar una eina útil per quantificar les potencialitats de diferents opcions front al futur i permetre actuar en base a criteris científics. En un món canviant, la direcció del canvi és incerta. El model LEAP-Andorra, en la línia de l'objectiu de l'actitud prospectiva (Godet and Roubelat, 1996), no busca eliminar la incertesa mitjançant la predicció il·lusòria, sinó que pretén reduir-la el màxim possible per guiar en la presa de decisions a partir de la visualització d'hipotètics futurs possibles.

Aquesta tesi busca, partint de l'àmbit energètic, contribuir en el camí cap a la sostenibilitat del país. No té sentit parlar de sostenibilitat del sector energètic andorrà. Tal com assenyalen Stahel et al. (2009), la sostenibilitat parcial no existeix ja que aquest és un terme que denota un procés global. En aquest sentit, el concepte transversal de seguretat energètica utilitzat en aquesta tesi (Cherp and Jewell, 2011) és d'utilitat per avançar en el camí cap a la sostenibilitat del conjunt del sistema des de l'àmbit energètic.

5.1 Seguretat energètica i sostenibilitat a Andorra

L'escenari de referència del model LEAP-Andorra preveu un increment continuat del consum d'energia final durant el període 2015-2050, estimulat principalment per l'evolució econòmica favorable i el creixement demogràfic. Tots els sectors d'activitat creixen en ús d'energia a excepció del transport que assoleix petits estalvis estimulats per la previsió de millora de l'eficiència energètica dels vehicles de combustió del parc de turismes. Les emissions de GEH incrementen en aquest escenari tot i que a menor ritme que l'energia final degut a la tendència de substitució de fuel domèstic per electricitat i l'exclusió del *fuel tourism* en la comptabilització de les emissions nacionals. Si ens centrem en la seguretat energètica, l'escenari de referència mostra els riscos de seguir les tendències dels darrers anys. Els indicadors de les diferents perspectives empitjoren, accentuant-se els valors crítics actuals. En termes de sobirania, la dependència energètica augmenta fins a valors propers al 100% i el cost de les importacions respecte el PIB del país es duplica. La robustesa del sistema es veu afectada, a través de l'increment del risc de saturació de les línies

d'importació d'electricitat combinat amb valors molt baixos de capacitat elèctrica instal·lada. Per últim, tampoc es preveuen millores en la resiliència del sistema ja que els diferents indicadors de diversitat mantenen en la majoria dels casos els valors actuals. Aquests resultats mostren la necessitat d'adoptar una actitud pro-activa, buscant provocar canvis desitjables que permetin millorar la seguretat energètica del sistema.

Durant el transcurs d'elaboració del doctorat (període 2011-2017), s'ha aprovat legislació i s'han implementat programes aparentment en la bona direcció, i en alguns casos, en la línia de les recomanacions derivades d'aquesta tesi. Alguns exemples en el sector residencial són el Programa d'ajuts a la millora de l'eficiència energètica dels edificis i l'ús de les energies renovables, el Decret de modificació del Reglament de la construcció en el qual s'aprova que almenys el 40% de la producció d'ACS ha de provenir d'energies renovables, el Reglament de regulació de l'activitat de generació d'energia elèctrica d'origen fotovoltaic en instal·lacions integrades en edificacions i interconnectades a la xarxa de baixa tensió així com el Decret pel qual s'aproven les condicions de compra de l'energia elèctrica generada en aquestes instal·lacions. O en el sector del transport, la llei de foment del vehicle elèctric, la modificació de la taxa sobre la tinença de vehicles per establir les quotes dels turismes en funció de les emissions de CO₂ així com els Programes Engega d'ajuts destinats a la millora de la seguretat i l'eficiència del parc nacional de vehicles.

El projecte *Potencial d'aprofitament solar en cobertes d'edificis del Pirineu* presentat breument en el Capítol 3 Secció 3.6.1 és un bon exemple tant d'eina per a l'anàlisi de polítiques⁴¹ com d'instrument per guiar la societat cap a escenaris desitjables a través de posar a la seva disposició informació objectiva derivada dels models desenvolupats⁴².

Dels escenaris alternatius desenvolupats se'n desprenen les línies prioritàries d'actuació, alguns riscos futurs del sistema i la capacitat d'assoliment dels compromisos climàtics. És imprescindible aplicar mesures d'estalvi i eficiència energètica en tots els sectors d'activitat del país⁴³ i particularment important dedicar esforços a implementar polítiques focalitzades en la transformació del sector del transport. En l'actualitat, a diferència dels altres sectors, el transport depèn gairebé en la seva totalitat del petroli. En termes de seguretat energètica aquesta és la principal feblesa del sector. Per la seva importància tant en ús d'energia som

⁴¹ En l'enllaç http://www.obsa.ad/leapandorra/docs/informe_tarifes_FV_OBSA.pdf s'inclou l'informe presentat a l'OECC d'anàlisi de les tarifes de compra de l'energia elèctrica generada en instal·lacions fotovoltaïques

⁴² Veure la plataforma d'incentiu de l'energia solar desenvolupada per l'OBSA: <http://obsa.ad/solar/>

⁴³ El Capítol 2 Secció 2.7.2 presenta la bateria de mesures analitzades en els diferents sectors

en generació d'emissions, l'assoliment dels objectius climàtics establerts en l'INDC (Govern d'Andorra, 2015) dependrà en gran mesura d'aconseguir revertir la tendència històrica d'aquest sector. En aquest sentit, serà clau complir l'objectiu establert en el Llibre Blanc de l'Energia, a priori ambiciós, de disposar l'any 2050 d'un 50% de vehicles elèctrics en el parc de turismes. Dels resultats obtinguts se'n deriva que els avenços tecnològics seran importants però seran indispensables també canvis d'hàbits en la societat. L'estalvi i l'eficiència energètica seran imprescindibles però insuficients per complir els compromisos climàtics establerts recentment pel que caldrà combinar accions en aquests àmbits amb mesures en l'abastiment d'energia.

Els dos escenaris òptims⁴⁴ mostren possibles camins que permetrien a Andorra complir amb el compromís establert en l'INDC per l'any 2030 al mínim cost econòmic i aportarien també millores sensibles en seguretat energètica. D'ells se'n desprèn que el futur passa inevitablement per les energies renovables. Com introduir-les serà tot un repte, en un país amb una notable densitat de població i on l'entorn natural és un dels valors més preuats. Caldrà també fer una important tasca pedagògica ja que qualsevol que aspiri a viure de les energies renovables i esperi que la infraestructura necessària per fer-ho no sigui intrusiva, viu en una contradicció. *"People love renewable energy"* explica Mackay (2009), i afegeix: *"unless it is bigger than a figleaf"*.

Els escenaris analitzats mostren que l'estratègia plasmada en el Llibre Blanc de l'Energia d'apostar per la cogeneració amb GNL és beneficiosa en termes de seguretat energètica però pot hipotecar a llarg termini l'assoliment dels compromisos climàtics. Aquest risc es fa especialment palès quan s'analitzen escenaris de reducció d'emissions a llarg termini (fins l'any 2050) més ambiciosos. Per estar en la línia del full de ruta de la UE, caldria reduir l'any 2050 el 80% de les emissions respecte els nivells de 1990 (Comissió Europea, 2016). L'estructura productiva d'Andorra amb un sector industrial pràcticament inexistent pot ser una dificultat afegida en l'assoliment d'importants reduccions d'emissions. És interessant explorar aquesta línia en profunditat ja que com passa a altres països com Irlanda, l'estructura econòmica del país representa una limitació per l'assoliment d'objectius climàtics més ambiciosos (Chiodi et al., 2013).

Els escenaris alternatius analitzats en el model LEAP-Andorra mostren que malgrat emprendre canvis profunds en el sistema energètic, els potencials màxims d'estalvi d'emissions van poc més enllà del 50% l'any 2050 respecte l'escenari Referència. Pel que fa a la seguretat energètica, hi ha riscos que persisteixen tot i els importants esforços (p.ex. la dependència dels combustibles fòssils i la diversitat en el sector del transport). Davant

⁴⁴ Veure Capítol 3 Secció 3.4 per més detall

aquestes evidències, caldrà seguir explorant alternatives però tot indica que serà necessari un canvi més profund, segurament més enllà del sector energètic. Dificilment es podran afrontar els reptes als que ens enfrontem únicament a través de solucions tecnològiques sinó que caldran canvis estructurals i inclús culturals. Arribats a aquest punt, tornem a una de les reflexions inicials d'aquest capítol, la impossibilitat de desvincular l'àmbit energètic de la resta de l'economia.

5.2 Treball en curs i línies de desenvolupament futur

En aquesta secció es detallen les línies d'estudi que es consideren prioritàries per enriquir el model LEAP-Andorra i en general la modelització de sistemes energètics al país. Val a dir que algunes d'aquestes línies ja estan en curs a través del treball conjunt amb l'OECC.

5.2.1 Futur del model LEAP-Andorra

LEAP és una eina de modelització que s'adapta plenament a les característiques i necessitats d'Andorra. La seva transparència i facilitat d'ús fan que sigui molt adequada per l'anàlisi i discussió dels seus resultats amb els diferents actors responsables de la presa de decisions. A diferència d'altres eines similars, LEAP és molt flexible i permet fer anàlisis inicials amb un baix requeriment de dades (Connolly et al., 2010). Entre les qualitats de LEAP, viscudes en primera persona, hi destaca el continu desenvolupament i l'àmplia comunitat que l'utilitza. Des de l'inici d'aquesta tesi s'han presentat noves versions, gairebé anualment (v.2012, v.2014, v.2015, v.2017) i multitud d'actualitzacions⁴⁵. S'han incorporat noves eines com la representació dels fluxos energètics a través de diagrames de Sankey, l'optimització de la generació elèctrica a través d'OSeMOSYS a més de millores contínues en la visualització i presentació de resultats, en la seguretat i el temps de simulació dels models. Puntualment apareixen problemes en les noves actualitzacions (p.ex. errors esporàdics en els indicadors) que són ràpidament solucionats gràcies a l'atent suport tècnic.

Pel que fa al model LEAP-Andorra, una de les línies de treball en curs és la desagregació dels diferents processos de generació elèctrica en instal·lacions concretes enlloc de fer-ho per tecnologies com fins ara. Això permetrà tractar de forma separada projectes d'una mateixa tecnologia però amb característiques diferenciades (p.ex. variació en els costos deguts a la ubicació de la instal·lació o diferents eficiències en funció de la disponibilitat de

⁴⁵ Detall de totes les actualitzacions a <https://www.energycommunity.org/default.asp?action=new>

recursos). Aquest nivell de detall permetrà també geolocalitzar les instal·lacions i preveure així el seu grau d'afectació a l'entorn.

La inclusió de criteris de seguretat energètica en els escenaris d'optimització és també una de les prioritats a mig termini. Una limitació de LEAP és que únicament permet utilitzar una variable restrictiva (p.ex. límit d'emissions de CO₂). Actualment, una de les alternatives consisteix en utilitzar el paràmetre *Renewable Target*⁴⁶ per imposar un mínim de generació elèctrica autòctona establint així criteris de sobirania energètica. En aquesta mateixa línia, tenint en compte que el futur del sistema energètic andorrà passa per les energies renovables, un àmbit interessant a explorar és la internalització de l'impacte visual o l'ús del sòl en els costos de les diferents instal·lacions.

El model LEAP-Andorra actual vincula el *fuel tourism* a la projecció del nombre de visitants i considera que el rati de combustible per visitant de 2015 es manté fins l'any 2050. El *fuel tourism* té una influència enorme en el sistema energètic i concretament en el sector del transport. Des de la perspectiva de la seguretat energètica, representa un risc important ja que dificulta la reducció de la dependència i l'increment de diversitat en el sector del transport. Per aquests motius, l'estudi en profunditat d'aquest àmbit hauria de ser una línia prioritària tot i les dificultats d'actuar sobre aquest element. Aquest és un exemple clar de la impossibilitat de desvincular el sistema energètic de la resta de l'economia.

Tot i que l'objectiu del model LEAP-Andorra no és predir valors exactes de consum d'energia o emissions del país, és important analitzar la incertesa del model per fer-lo més fiable i poder informar sobre possibles variacions en els resultats. Una important font d'incertesa del model són els paràmetres d'entrada ja que en alguns casos són estimacions, projeccions d'organismes externs o valors observats en altres països. En àmbits específics com el parc de turismes ja s'ha realitzat un anàlisi de sensibilitat per caracteritzar com respon el model a canvis en els paràmetres d'entrada (Travesset-Baro et al., 2016). Seria desitjable estendre aquest anàlisi al conjunt del model. D'altra banda, caldrà fer validacions periòdiques dels resultats del model a través de dades reals per tal d'ajustar els diferents paràmetres i variables.

A continuació s'enumeren altres línies d'estudi a tenir en consideració a mig termini amb l'objectiu d'incrementar la fiabilitat i la capacitat d'anàlisi del model LEAP-Andorra:

- Projeccions futures de la generació elèctrica a Espanya i França. El model actual considera les emissions i els factors d'energia primària de l'electricitat espanyola

⁴⁶ Aquest paràmetre especifica el percentatge mínim de producció dels processos definits com a renovables en els escenaris d'optimització. Amb l'objectiu de fomentar la generació local, poden definir-se com a renovables tots els processos autòctons

i francesa constants fins l'any 2050. En la mesura que es disposi de projeccions fiables d'aquestes variables en ambdós països serà interessant incloure-les en el model. Disposar dels costos mensuals de l'electricitat importada tant de França com d'Espanya és un altre element que aportaria major potencial al model.

- Ampliar l'anàlisi econòmic realitzat introduint en el model els costos de les diferents mesures d'estalvi. Això permetria, entre altres, calcular els costos de reducció d'emissions dels diferents escenaris.
- Incloure en el model el càlcul d'altres indicadors de seguretat energètica, especialment en la perspectiva de la robustesa. Concretament, un indicador important en aquesta perspectiva és l'edat de les infraestructures (p.ex. infraestructures de generació, transformació, transport i distribució d'electricitat).
- Ampliar l'escala espacial del model. Actualment el model treballa a escala de país. Un possible desenvolupament futur podria segregat el model actual en les set parròquies del país. Un canvi d'aquestes característiques tindria implicacions directes en sectors com el residencial (p.ex. calefacció, tipologia d'habitatges) i menys en sectors com el transport que són de caire més global.
- Estudiar de forma integrada els recursos energètics, el recurs hídic i el canvi climàtic. Els resultats obtinguts en el model mostren la importància de l'energia hidroelèctrica en el futur sistema energètic andorrà. Això fa que el model sigui molt sensible a la disponibilitat de recurs hídic pel que l'estudi en aquesta línia pot ser vital a mig i llarg termini. Semertzidis (2015) presenta un recull d'eines específiques per abordar el vincle recurs energètic-recurs hídic. Concretament, LEAP pot integrar-se amb WEAP⁴⁷ (*Water Evaluation and Planning system*) permetent la realització d'anàlisis integrats aigua-energia-emissions (Mehta and Yates, 2012).

5.2.2 Més enllà del model LEAP

Disposar d'un alt nivell de detall en els models *bottom-up* és fonamental per a que aquests siguin útils en l'anàlisi de l'impacte de futures polítiques. Com a exemple, el model d'estoc desenvolupat en el sector del transport ha permès la quantificació del potencial de múltiples mesures d'estalvi i eficiència energètica. Addicionalment, l'alt nivell de desagregació aconseguit permetrà incorporar millores en propers inventaris nacionals d'emissions de

⁴⁷ Més detall a <http://www.weap21.org/>

GEH d'Andorra en el sector del transport. La desagregació en sub-sectors, la discriminació del *fuel tourism* i el detall de les tecnologies existents, permet passar d'una metodologia de comptabilització de GEH de nivell 1 (Tier 1) a nivell 2 (Tier 2), segons la metodologia IPCC. Concretament, el salt de metodologia Tier 1 a Tier 2 és la recomanació principal que l'assessor de Nacions Unides va fer a Andorra arran del primer inventari realitzat (Govern d'Andorra, 2013). Per aquest motiu, és necessari destinar esforços en l'adquisició i generació de dades que puguin alimentar aquest tipus de models. En aquest sentit, hi ha un bon nombre de línies a treballar. Entre les prioritàries hi destaca la necessitat de conèixer amb major detall els equipaments tecnològics dels habitatges andorrans (p.ex. tipus d'equips de climatització, il·luminació, etc.) a més de fer-ne un seguiment periòdic per detectar tendències com el canvi de fuel domèstic a electricitat. En la mateixa línia, degut al seu pes en el sistema energètic, és de vital importància recopilar dades del sector terciari que permetin passar d'una metodologia *top-down* a *bottom-up* en aquest sector i poder així estudiar-lo en major profunditat.

Els resultats del model LEAP-Andorra mostren dos línies claus en el futur model energètic andorrà. Per una banda, les energies renovables i per l'altra, els vehicles elèctrics. L'anàlisi del potencial de les diverses fonts d'energia renovable del país s'ha treballat en diferents estudis, tot i que malauradament en la major part dels casos a través de documents no públics. Abordar amb major profunditat aquest camp i ser transparent amb els resultats obtinguts serà fonamental per facilitar futurs processos de modelització del sistema energètic d'Andorra. L'objectiu per part del Govern d'Andorra d'aconseguir una introducció massiva de vehicles elèctrics al sistema energètic a mitjà i llarg termini fa necessari analitzar els efectes que aquest fet pot provocar en l'operació de la xarxa elèctrica nacional. En aquest sentit, la modelització ha demostrat en altres indrets que és una eina útil per preveure'n l'impacte i quantificar els beneficis de controlar els règims de càrrega de les bateries (Calnan et al., 2013; Foley et al., 2013).

Aquesta tesi presenta un model que integra, en la mesura de les seves possibilitats, qüestions ambientals, econòmiques i socials. Per avançar cap a models amb un major nivell d'integració cal reforçar cada una de qüestions esmentades. La combinació de metodologies d'anàlisi del cicle de vida (LCA, per les seves sigles en anglès) amb la modelització de sistemes energètics és un marc de referència per analitzar de forma integrada tant els impactes actuals del sector elèctric (Atilgan and Azapagic, 2016) com els donats en escenaris futurs (García-Gusano et al., 2017).

Tal com assenyalen Gargiulo and Gallachóir (2013), el comportament social respecte l'ús de l'energia representa la dimensió més desconeguda fins al moment, assumint en la major part dels models una resposta racional als canvis de preu de l'energia. En aquest sentit, un

repte clau pels futurs models d'energia, és el desenvolupament de mètodes quantitius per incorporar anàlisis científics de comportament social.

Tornat de nou al concepte presentat en l'inici d'aquest capítol sobre la inexistència d'una sostenibilitat parcial, un camí interessant a explorar a nivell de país és la construcció d'un model integrat d'Andorra que vagi més enllà del sistema energètic. En la línia del model TIMER (*The Targets IMage Energy Regional model*) formant part del model global IMAGE 2.2 (Vries et al., 2001), LEAP-Andorra podria estar integrat en un model de major abast que representés el conjunt del país. Un repte d'aquestes característiques planteja un altre repte a nivell de país, la creació d'un equip de treball multidisciplinari amb participació de les institucions amb major coneixement dels principals àmbits estratègics nacionals.

Reprenent l'actitud prospectiva, disposar de models que representin el sistema en el que vivim ens cridarà a l'acció i els escenaris marcaran el camí a seguir. El proper pas natural és escollir l'estratègia per arribar al futur desitjat. Tal com s'ocupa de recordar-nos Godet (1991): "el futur no està escrit, està per fer".

5.3 Referències

- Atilgan, B., Azapagic, A., 2016. An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. *Energy Policy* 93, 168–186. doi:10.1016/j.enpol.2016.02.055
- Calnan, P., Deane, J.P., Ó Gallachóir, B.P., 2013. Modelling the impact of EVs on electricity generation, costs and CO₂ emissions. *Energy Policy* 61, 230–237. doi:10.1016/j.enpol.2013.05.065
- Cherp, A., Jewell, J., 2011. The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 3, 202–212. doi:10.1016/j.cosust.2011.07.001
- Chiodi, A., Gargiulo, M., Deane, J.P., Lavigne, D., Rout, U.K., Ó Gallachóir, B.P., 2013. Modelling the impacts of challenging 2020 non-ETS GHG emissions reduction targets on Ireland's energy system. *Energy Policy* 62, 1438–1452. doi:10.1016/j.enpol.2013.07.129
- Comissió Europea, 2016. 2050 low-carbon econom. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en

- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V., Leahy, M., 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Appl. Energy* 87, 1059–1082. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.026
- Costanza, R., Leemans, R., Boumans, R., Gaddis, E., 2007. Integrated global models, in: *Sustainability or Collapse? An Integrated History and Future of People on Earth*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 417–446.
- Easterling, W.E., 1997. Why regional studies are needed in the development of full-scale integrated assessment modelling of global change processes. *Glob. Environ. Chang. Part A* 7, 337–356.
- Foley, A., Tyther, B., Calnan, P., Ó Gallachóir, B., 2013. Impacts of Electric Vehicle charging under electricity market operations. *Appl. Energy* 101, 93–102. doi:10.1016/j.apenergy.2012.06.052
- García-Gusano, D., Garraín, D., Dufour, J., 2017. Prospective life cycle assessment of the Spanish electricity production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75. doi:10.1016/j.rser.2016.10.045
- Gargiulo, M., Gallachóir, B.Ó., 2013. Long-term energy models: Principles, characteristics, focus, and limitations. *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* 2, 158–177. doi:10.1002/wene.62
- Godet, M., 1991. *De l'anticipation à l'action: manuel de prospective et de stratégie*.
- Godet, M., Roubelat, F., 1996. Creating the future: the use and misuse of scenarios. *Long Range Plann.* 29, 164–171.
- Govern d'Andorra, 2015. *Contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN) de l'Andorre*.
- Govern d'Andorra, 2013. *Inventari de les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle (GEH) d'Andorra*.
- Mackay, J.C., 2009. *Sustainable Energy — without the hot air*. UIT Cambridge, England.
- Mehta, V., Yates, D., 2012. *Integrated water-energy-emissions analysis : Applying LEAP and WEAP together in California*, Stockholm Environment Institute Policy Brief.
- Semertzidis, T., 2015. Can energy systems models address the resource nexus? *Energy Procedia* 83, 279–288. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.182
- Stahel, A., Cendra, J., Canadell, À., Cano, M., Bernal, R., Cucina, M., Lazzarini, B., Lobera, J., 2009. Desarrollo sostenible: ¿Sabemos de qué estamos hablando? -Principios básicos para hablar un mismo lenguaje-, in: *II Congreso Internacional de Medida Y Modelización de La Sostenibilidad (ICSMM 09)*. CIMNE, Barcelona, pp. 1–16.

- Travesset-Baro, O., Gallachóir, B.P.Ó., Jover, E., Rosas-Casals, M., 2016. Transport energy demand in Andorra. Assessing private car futures through sensitivity and scenario analysis. *Energy Policy* 96, 78–92. doi:10.1016/j.enpol.2016.05.041
- Vries, B. De, Vuuren, D. Van, Elzen, M. Den, Janssen, M., 2001. Targets IMage Energy Regional (TIMER) Model, Technical Documentation, RIVM report 461502024 2001. Bilthoven, Netherlands.

ANNEX A GLOSSARI D'ACRÒNIMS

ACS	Aigua calenta sanitària
AESE	Associació d'Entitats del Sector Energètic
AVEBIOM	<i>Asociación española de valorización energética de la biomasa</i>
CCIF	Classificació del Consum Individual per Finalitats
CTR	Central de Tractament de Residus
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EPF	Enquesta de Pressupostos Familiars
ETR	Estació transformadora i repartidora
ETSAP	<i>Energy Technology Systems Analysis Programme</i>
FC	Factor de capacitat
FEDA	Forces Elèctriques d'Andorra
FHASA	Forces Hidroelèctriques d'Andorra S.A.
GCAM	<i>Global Change Assessment Model</i>
GD	Graus dia
GEH	Gasos d'efecte hivernacle
GLP	Gasos líquats del petroli
GNL	Gas natural líquat
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IAM	<i>Integrated Assessment Model</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGM	<i>Integrated Global Model</i>
IIASA	<i>International Institute for Applied Systems Analysis</i>
INDC	<i>Intended Nationally Determined Contribution</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
ITV	Inspecció Tècnica de Vehicles
JGCRI	<i>Joint Global Change Research Institute</i>
LCA	<i>Life cycle assessment</i>
LEAP	<i>Long-range Energy Alternatives Planning system</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MARKAL	<i>Market Allocation</i>
MDE	Model digital d'elevacions
MESSAGE	<i>Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environment impact</i>
NEA	<i>National Environment Agency</i>
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>

O&M	Operació i manteniment
OBSA	Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra
OCDE	Organització de Cooperació i Desenvolupament Econòmic
OMIE	<i>Operador del Mercado Ibérico de Energía</i>
OSeMOSYS	<i>Open Source Energy Modelling System</i>
PET	<i>Pan European TIMES</i>
PIB	Producte interior brut
PNNL	<i>Pacific Northwest National Laboratory</i>
RES2020	<i>Renewable Energy Strategy 2020</i>
SCE	Severitat climàtica d'estiu
SCH	Severitat climàtica d'hivern
SEI	<i>Stockholm Environment Institute</i>
SIG	Sistema d'informació geogràfica
SUMM Lab	<i>Sustainability Measurement and Modelling Lab</i>
TIC	Tecnologies de la informació i la comunicació
TIMES	<i>The Integrated MARKAL-EFOM System</i>
UE	Unió Europea
VCA	<i>Vehicle Certification Agency</i>

ANNEX B PUBLICACIONES CIENTÍFIQUES

ATENCIÓ i

Per respecte als drets de “copyright”, les pàgines 185 a 230 de la tesi -que contenen els articles mencionats a continuació- s’han de consultar a les webs dels editors

- B.1** *Building rooftops photovoltaic potential in mountainous regions: a case study from the Pyrenees*. Accepted extended abstract in European PV Solar Energy Conference (EUPVSEC-2017).

www.obsa.ad/solar/docs/Abstract_EUPVSEC_2017.pdf

- B.2** *Transport energy demand in Andorra. Assessing private car futures through sensitivity and scenario analysis*. *Energy Policy*, 96, 78–92. doi: 10.1016/j.enpol.2016.05.041

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516302683>

- B.3** *Long-term energy security in a national scale using LEAP. Application to decarbonization scenarios in Andorra*. Abstract and poster presentation in European Geosciences Union General Assembly (EGU2016).

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..1815936T>

- B.4** *Impact of the car purchase subsidy policy in Andorra: an ex-post analysis of CO₂ emissions reduction*. International Conference on Urban and Regional Resilience (RESURBE III).

<http://www.springer.com/series/14171>

- B.5** *Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 16–26. doi: 10.1016/j.trd.2014.09.006

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920914001424>