

Doctorat en Sostenibilitat

Institut de Sostenibilitat. Universitat Politècnica de Catalunya

PROPOSTA DE TESI

Prospectiva i planificació estratègica de l'energia al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista

Autor: Oriol Travesset Baró

Directors: Martí Rosas Casals, Laboratori de Mesura i Modelització de la Sostenibilitat

Èric Jover Comas, Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra

Barcelona, juny de 2014

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 a mitjà i llarg termini exitosa. Andorra, ha iniciat el camí de transició cap al seu model energètic de futur, definint-ne les primeres passes en la recent publicació del Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra. La proposta de tesi aquí plantejada, 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 de la tesi doctoral té com a objectiu la construcció d'un model del sector energètic andorrà. Aquest integrarà factors socioeconòmics i ambientals representant les interaccions del sistema energètic amb els principals aspectes influents en la dinàmica nacional. El model avaluarà 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. El model resultant servirà 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.

Previ a la construcció del model, es desenvoluparà un estudi inicial de la seguretat energètica d'Andorra, identificant els indicadors claus a tenir presents durant tot el procés. La construcció del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica, es basarà en dades històriques i pronòstics d'institucions nacionals i internacionals, complementades amb la generació de dades pròpies que permetran enriquir allò que ja és disponible i adaptar-ho a la realitat andorrana. La modelització s'inicia amb la caracterització del consum d'energia final del país, buscant estimar l'evolució de la demanda energètica nacional des de l'actualitat fins l'any 2050. S'identificarà i es desglossarà la procedència dels principals àmbits consumidors del país, així com la tecnologia existent en l'actualitat, permetent l'anàlisi de la potencialitat de diverses opcions tecnològiques en els diferents sectors. L'altre pilar del sector energètic, l'abastiment d'energia, es modelitzarà en segon terme, simulant la conversió d'energia primària i el transport d'aquesta fins als punts de consum final. Els costos econòmics i les externalitats ambientals de cadascun dels mòduls seran representats, formant part de l'anàlisi cost benefici de cadascun dels escenaris resultants. Per últim, el model permetrà 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 des de la perspectiva de la seguretat energètica.

En última instància, els resultats derivats de la tesi haurien de contribuir a garantir el subministrament energètic d'Andorra en condicions respectuoses amb la societat, el medi ambient i compatibles amb el desenvolupament econòmic del país.

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 has initiated the process towards his future energy system with the development of the Energy White Paper. This thesis proposal 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 will integrate socioeconomic and environmental factors representing the links between energy systems and key national dynamics. The model will assess 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 will serve as a tool to support decision making actions and allowing the construction of exploratory and normative scenarios which will help to visualize multiple futures and the strategies to achieve them.

Prior to the building of the model, an initial energy security study will be developed to identify key indicators to support the building of the integrated assessment model of Andorra's energy security. This is based on historical data and forecasts of national and international organizations. It will be complemented with generated own data to enrich the already available and to adapt it to the reality of Andorra. The modelling process starts with the final energy consumption characterization, estimating national energy demand from present to year 2050. Main consumer sectors and energy technologies will be identified and disaggregated, allowing the analysis of the potential technological options in different sectors. Then, the other mainstay of energy system, energy supply, will be modelled to simulate the conversion of primary energy and the transport to final consumption centres. Economic costs and environmental externalities will be represented through cost-benefit analysis of resulting scenarios. The model will allow the input of policy strategies to build alternative scenarios and assess its impacts and feasibility, under the perspective of energy security.

Finally, the results derived from the thesis should contribute to ensure the energy supply in accordance with society and environment respect, and supporting economic development in the country.

Índex general

1	Introducció	8
2	Estat de l'art	10
2.1	Prospectiva	11
2.2	Mètode d'escenaris	12
2.3	Models d'Avaluació Integrada	15
2.3.1	Models regionals	18
2.3.2	Models de planificació energètica	19
2.4	Perspectives en seguretat energètica	27
3	Objectius de la tesi	31
3.1	Objectiu general	31
3.2	Objectius específics	31
4	Metodologia	32
4.1	Marc d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra	32
4.1.1	Indicadors	32
4.2	Implementació del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica	33
4.2.1	Modelització del consum d'energia final	35
4.2.2	Modelització de l'abastiment d'energia	38
4.3	Anàlisi d'escenaris i avaluació de la seguretat energètica futura	41
5	Planificació, desenvolupament de la tesi i resultats obtinguts	42
5.1	Estat actual de la recerca	42
5.1.1	Avaluació inicial de la seguretat energètica	42
5.1.2	Sector del transport	46
5.2	Pla de treball	51
5.2.1	Juny – Agost 2014	51
5.2.2	5è Semestre – Setembre 2014 a Febrer 2015	51
5.2.3	6è Semestre – Març 2015 a Agost 2015	51
6	Bibliografia	53
7	Publicacions i altres índex de qualitat	58

Annex I. Travesset-Baró, O., Rosas-Casals, M., Jover, E., 2014. Transport energy consumption in mountainous landscapes. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. (Submitted to *Transportation Research Part D: Transport and Environment*)

Índex de figures

Fig. 1. Cerques realitzades a “Google Books” en el període 1950-2000 per la paraula clau “scenarios”. Font: http://books.google.com/ngrams	13
Fig. 2. Percentatge i mitja anual d’articles publicats (*Només dos anys). Font: Varum & Melo 2010.....	13
Fig. 3. Escenari de referència de la publicació “The Limits to Growth”. Font: Meadows et al. 1992.....	14
Fig. 4. Diagrama de complexitat dels principals IGMs. Font: Costanza et al. 2007.....	16
Fig. 5. Tipologia de Models d’Avaluació Integrada. Font: Weyant et al. 1996.....	17
Fig. 6. Categories principals de models d’energia.....	21
Fig. 7. Esquema de l’estructura d’un sistema energètic bàsic del model MESSAGE. Font: IIASA 2012.....	23
Fig. 8. Equilibri en el cas d’un servei energètic. Font: Loulou et al. 2004	24
Fig. 9. Diagrama representatiu del sector energètic modelitzat en el model EnergyPLAN. Font: Lund 2013.....	26
Fig. 10. Integració de les 3 perspectives en seguretat energètica. Font: Cherp & Jewell 2011..	30
Fig. 11. Estructura del model integrat d’avaluació de la seguretat energètica d’Andorra	34
Fig. 12. Diagrama de Sankey del consum d’energia final a Andorra. Infografia: Excel to Sankey (Bruce McPherson)	35
Fig. 13. Estructura del model UKDCM. Font: Kavgc et al. (2010)	37
Fig. 14. Estructura general d’un mòdul d’abastiment d’energia en LEAP. Font: SEI 2011.....	39
Fig. 15. Diagrama del mòdul LEAP d’abastiment elèctric d’Andorra	40
Fig. 16. Procés de generació de resultats de LEAP en mode d’optimització. Font: Heaps 2011	41
Fig. 17. Estructura general dels sistemes energètics. Font: Jewell 2011	42
Fig. 18. Diagrama de Sankey representant el flux d’energia del sistema energètic d’Andorra. Infografia: Excel to Sankey (Bruce McPherson)	43
Fig. 19. Consum total d’energia a Andorra (expressat tones equivalents de petroli d’energia primària).....	43
Fig. 20. Dependència energètica total i de les importacions d’electricitat pel període 2004-2011	44
Fig. 21. Intensitat energètica d’Andorra pel període 2000-2012.....	44
Fig. 22. Consum energètic TTW i ratio TTW segons els diferents escenaris i cicles de conducció considerats. ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle), EV (Electric Vehicle).....	48
Fig. 23. Estoc del parc automobilístic d’Andorra l’any 2013, segons edat, cilindrada i combustible utilitzat.....	49
Fig. 24. Distribució de vehicles del parc automobilístic actual en funció de la cilindrada i el combustible utilitzat.....	49
Fig. 25. Procés del desenvolupament del model d’estoc de turismes del parc automobilístic..	50
Fig. 26. Perfil d’activitat (km/any) en funció de l’antiguitat del vehicle	50
Fig. 27. Diagrama de Gantt de la planificació de la tesi. En verd, planificació d’estada de recerca a l’ <i>Energy Policy & Modelling Group de l’Environmental Research Institute (University College Cork, Ireland)</i>	52

Índex de taules

Taula 1. Característiques dels models “top-down” i “bottom-up”. Font: Nakata 2004	20
Taula 2. Característiques principals dels models d’energia presentats	21
Taula 3. Les tres perspectives en seguretat energètica. Font: Cherp & Jewell 2011.....	29
Taula 4. Indicadors en seguretat energètica d’aplicació al model integrat d’avaluació de la seguretat energètica d’Andorra	45
Taula 5. Resum dels escenaris considerats	47

1 Introducció

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 & Hafemeister 2010): (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. Experts, tant de l'àmbit acadèmic com del professional, coincideixen en indicar que estem molt a prop de superar -si no s'ha fet ja- el *peak oil* o zènit del petroli, és a dir, el punt en el qual s'assoleix la màxima producció i s'arriba a la meitat del petroli existent inicialment. L'esgotament progressiu, unit a la concentració de les reserves, provoca que el risc de conflictes geopolítics vagi en augment, potenciant la inestabilitat internacional i posant en risc la seguretat d'abastiment. D'acord amb les dades publicades per l'Agència Internacional de l'Energia (IEA 2012), en l'escenari de referència la demanda mundial d'energia creix més d'un terç fins a 2035, impulsada en gran part per l'augment de vehicles en els països emergents. Tal increment provocaria un augment de temperatura, segons el Panell Intergovernamental en Canvi Climàtic (IPCC), superior als 3,5°C (IPCC 2007). Informacions recents de l'Administració Nacional d'Oceans i Atmosfera dels Estats Units (NOAA), confirmen aquesta tendència creixent, afirmant que la concentració de CO₂ a l'atmosfera supera per primera vegada en la història les 400 ppm (NOAA 2013).

L'estat actual obliga a tots els actors involucrats en el sector energètic, i especialment als governants, a prendre mesures per redreçar la situació o almenys minimitzar les greus conseqüències derivades d'un consum d'energia sense precedents. Els efectes combinats de l'esgotament dels recursos no renovables i el canvi climàtic estan empenyent a la humanitat en la direcció de substituir els combustibles fòssils per formes d'energia més netes i abundants i tot i que algunes dades mostren ja l'inici de l'esperada transició energètica, el camí no sembla que hagi de ser fàcil (Bardi 2013).

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 destaquen per damunt de tot, l'alta dependència exterior i el risc de saturació de les xarxes d'importació elèctrica. Un altre aspecte que condiona la política energètica del país, és l'adhesió l'any 2011 al Conveni marc de les Nacions Unides, la qual cosa compromet Andorra a promoure i adoptar estratègies nacionals de mitigació i adaptació al canvi climàtic. En les darreres dècades, la situació d'Andorra s'ha caracteritzat per una bipolarització dels productes energètics en hidrocarburs i electricitat. Aquesta última, a diferència dels hidrocarburs que han patit una suau davallada des de l'any 2005, manté la tendència de creixement representant un 44% de l'energia (expressada en energia primària) que es consumeix al Principat (Departament d'Estadística 2014). 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). Particularitat que 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 al 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 o l'estudi encarregat per l'AESE (Associació d'Entitats del Sector Energètic) sobre l'aprofitament dels recursos naturals d'Andorra (documents no públics).

En la tesina final del màster en Sostenibilitat, "Modelització del consum energètic a Andorra. Apunts per a la definició d'un Model Integrat a escala regional" (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 iniciada arrel de la col·laboració amb l'OBSA i FEDA es ratifica en aquesta tesi doctoral, aportant un interès tècnic complementari al purament científic i facilitant la transferència bidireccional de coneixement amb FEDA, empresa pública principal gestora de l'energia d'Andorra.

2 Estat de l'art

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, tal com assenyala Malaska, amb 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 confiança en referents diversos, els quals n'han guiat les seves 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. Els grecs consideraven Delfos el centre del món i la residència de l'oracle. Durant els segles III i VI aC, la seva importància era tal que atreia tot tipus de cabdills i governadors, molts dels quals van prendre decisions en funció de les respostes que els donaven les pitonisses del temple. No només els grecs el consultaven, sinó també altres civilitzacions del Pròxim Orient que creien fermament en les profecies de les sacerdotesses de Delfos, que van arribar a determinar el curs dels grans episodis de la història antiga (Janer 2011).

Tal com s'ha assenyalat, 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. Tots aquests però, es basen en procediments molt allunyats del mètode científic.

Per les característiques pròpies del futur, es fa 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. Flechteim 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.

2.1 Prospectiva

Tota forma de predicció és una impostura. El futur no està escrit, sinó que s'ha de construir. El futur és múltiple, indeterminat i obert a una gran varietat de futurs possibles. El demà, depèn menys de les fortes tendències que s'imposarien fatalment als homes que de les polítiques que aquests desenvolupen amb l'objectiu de fer front a aquestes tendències (Godet & Roubelat 1996). Aquesta reflexió de Godet explica força bé l'essència de l'actitud prospectiva, detallada a continuació.

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). Gaston Berger, que a més de filòsof va ser un important industrial de l'època i una figura influent en les decisions de la política francesa, 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 tan, 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 (Godet & Roubelat 1996). L'estructur 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.

Seguint amb les diferents actituds amb les que es pot afrontar el futur, 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 & Roque 1993). Per la seva banda, a Andorra es va publicar uns anys enrere el *Programa Andorra 2020* (Govern d'Andorra 2007b), amb l'objectiu d'orientar la política de futur del país.

2.2 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, 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" (Van der Heijden 2005). Aquest autor és considerat per la major part de la bibliografia com el pare de la planificació d'escenaris.

El desenvolupament inicial del mètode d'escenaris es va polaritzar en dos focus geogràfics. Per una banda, als Estats Units va ser introduït en el camp de la indústria com una eina de planificació estratègica pel Royal Dutch/Shell Group a inicis de 1970 per Pierre Wack. D'altra banda, França va ser el focus europeu en l'estudi de la disciplina. A mitjans dels setanta, Godet va desenvolupar escenaris per diverses institucions i companyies, contribuint al desenvolupament de "La Prospective School" (Van der Heijden 2005).

Van der Heijden i Schwartz són dos dels autors principals en la divulgació del mètode d'escenaris. Aquest últim la defineix com un enfocament orientat a processos estratègics, que té una visió del món impredecible, però reconeix que les tendències i alguns esdeveniments poden ser predictibles (Schwartz 1991). Aquesta definició és molt similar a la visió aportada per l'enfocament prospectiu, pel que es pot considerar el mètode d'escenaris com una tècnica per plasmar l'actitud prospectiva en els estudis de futur. La prospectiva crida a l'acció, i els escenaris marquen el camí en funció de la visió adoptada i de la probabilitat. El següent pas natural, és escollir l'estratègia a seguir per arribar al futur desitjat.

Segons Godet, 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 (Godet & Roubelat 1996). Aquest, identifica dues tipologies d'escenaris en funció del tipus de visió adoptada:

- *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 & Roubelat 1996).

Durant les últimes dècades, l'interès en el mètode d'escenaris ha crescut de forma considerable. Així ho demostra l'important augment registrat en les cerques realitzades a "Google Books" (Fig. 1).

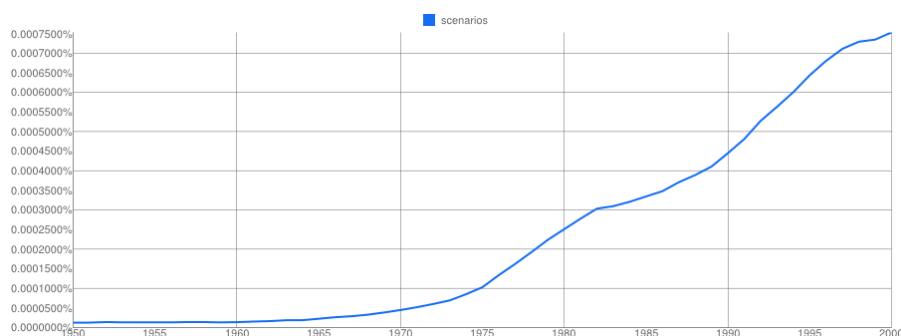


Fig. 1. Cerques realitzades a "Google Books" en el període 1950-2000 per la paraula clau "scenarios". Font: <http://books.google.com/ngrams>

La literatura registrada en aquest àmbit també ha augmentat exponencialment en els últims temps (Varum & Melo 2010). Durant els primers vint anys des del seu naixement a la dècada dels setanta, el nombre d'articles publicats es mantenen constants, i és a principis dels noranta quan s'inicia un important creixement. Entre els anys 2004 i 2006 es produeix el nombre més alt de publicacions i més del 70% dels articles han estat publicats en els últims sis anys analitzats (Fig. 2).

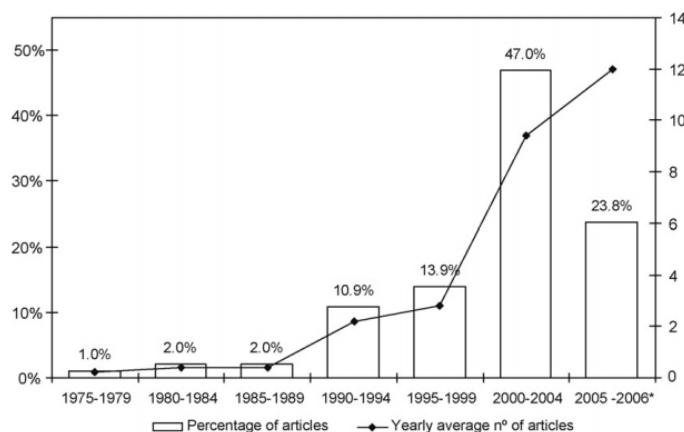


Fig. 2. Percentatge i mitja anual d'articles publicats (*Només dos anys). Font: Varum & Melo 2010

Bert J.M. de Vries aporta una interpretació interessant sobre el mètode d'escenaris des d'una perspectiva històrica (de Vries 2007). Segons aquest autor, l'entrada de la ciència i la tecnologia en el món modern introdueix una nova eina de control i gestió que desafia i qüestiona els antics centres d'autoritat. D'aquesta manera, nous actors poderosos apareixen en l'escena de la presa de decisions: científics, empresaris, corporacions, grups de ciutadans i inclús organitzacions no governamentals. La ciència i la tecnologia comencen a oferir eines que porten a formes de control i gestió més racionals. Aquest paradigma de control, també s'ha topat amb algunes limitacions en les últimes dècades, generalment associades al foment d'un desenvolupament basat en la tecnocràcia. La difusió de l'educació, la comunicació i les formes democràtiques de govern, juntament amb les conseqüències no desitjades d'aquesta "mecanització del món", han provocat que el que solia ser vist com un èxit sense precedents, sigui cada vegada més qüestionat. Simultàniament, la ciència s'ha adonat de les limitacions del paradigma Newtonià i ofereix noves perspectives en l'estudi dels sistemes complexos. De Vries argumenta que el mètode d'escenaris, amb les consideracions explícites d'incerteses, múltiples perspectives i actors interessats, és el pas lògic i natural en el desenvolupament de noves formes de presa de decisions.

El mètode d'escenaris és 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. 3, la societat mundial es manté en la seva via històrica mentre li sigui possible sense canvis polítics fonamentals. La producció industrial i la població creixen fins que una combinació de restriccions del medi ambient i dels recursos naturals eliminen la capacitat del sector del capital per 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).

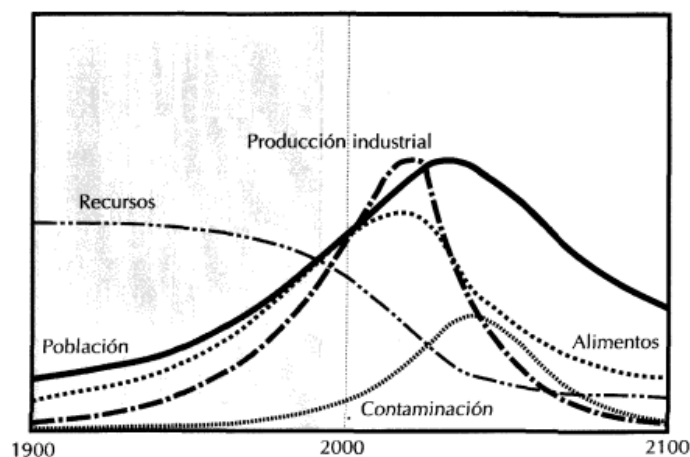


Fig. 3. Escenari de referència de la publicació "The Limits to Growth". Font: Meadows et al. 1992

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" (Brundtland 1987), fruit dels treballs de la Comissió Mundial de Medi Ambient i Desenvolupament de les Nacions Unides 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.

2.3 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 & 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 (IGM, 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 es dona un gran avenç en el camp de la computació, el qual 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 en part per la universalització dels ordinadors, 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. 4 il·lustra el grau en que cada IGM analitzat per Costanza et al. (2007), analitza els sistemes naturals i socials, així com el nivell de calibratge històric implementat fins ara pels principals IGMs existents.

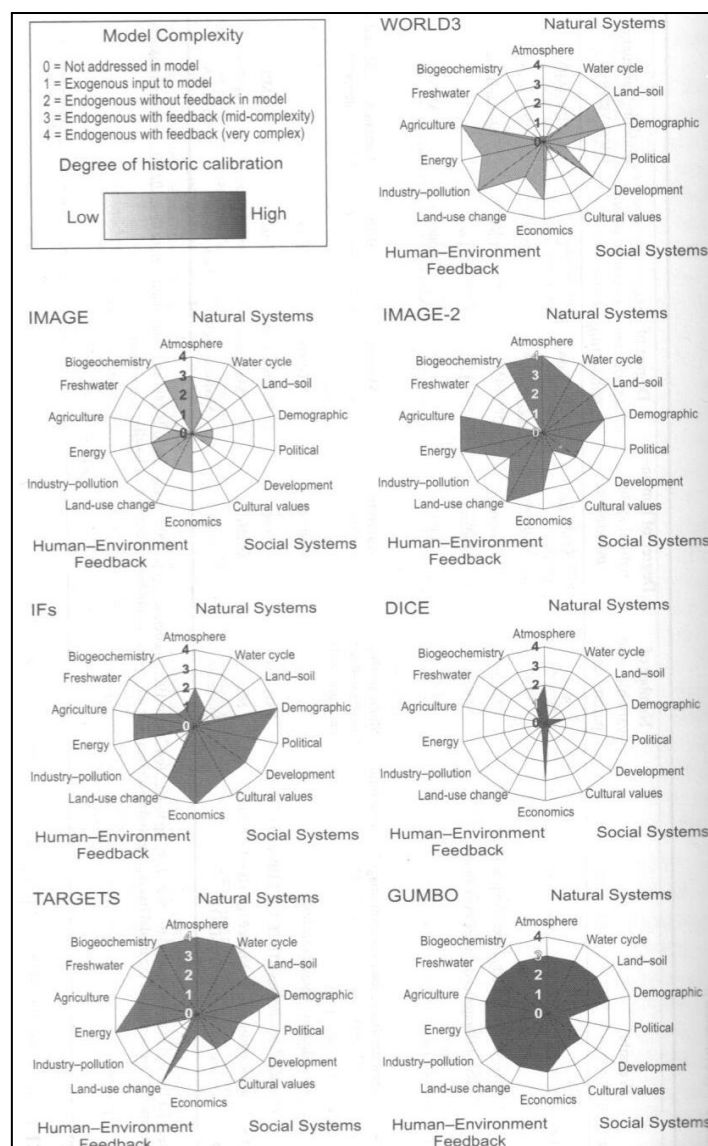


Fig. 4. Diagrama de complexitat dels principals IGMs. Font: Costanza et al. 2007

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 condiciona 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.

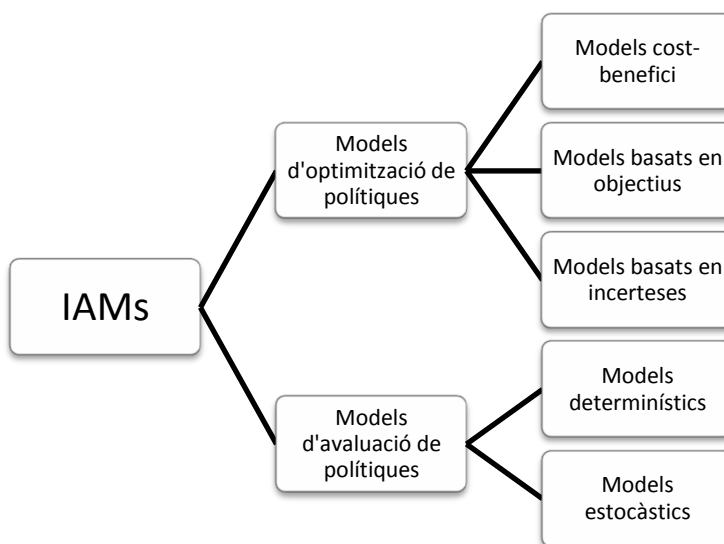


Fig. 5. Tipologia de Models d'Avaluació Integrada. Font: Weyant et al. 1996

La Fig. 5 resumeix la tipologia de 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 varies 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 (Rotmans & Asselt 2003). Malgrat l'orientació dominant cap a la modelització global, Rotmans assenyalava 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.

2.3.1 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" és característic dels models regionals i aporta a aquests algunes característiques que els fa especialment interessants en determinats casos. En parlar de models regionals, inicialment cal preguntar-se que s'entén per regió. Una regió, és per definició, una porció de terreny més petita que el planeta i més gran que un punt sobre la superfície de la Terra. Partint d'aquesta definició, el rang espacial en que poden actuar els models regionals és enorme i cal valorar en cada cas l'escala més convenient amb la qual treballar. 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. Així doncs, els objectius marcats en l'inici de l'estudi són els que establiran l'escala idònia del model.

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 argumenta deu raons per justificar la necessitat d'enllaçar els estudis regionals amb els models globals (Easterling 1997). Aquestes raons inclouen factors com ara:

- (1) L'existència de discontinuïtats d'escala espaciotemporal requereix de models jeràrquics acoblats per aportar informació de diferents escales temporals i espacials.
- (2) La major part de les bases de dades ambientals i socials existents contenen informació a escala regional.
- (3) Els avenços en l'estudi del canvi climàtic sovint provenen d'experiments realitzats a petita escala, i la modelització del procés es sovint validada amb resultats d'experiments a escala regional.
- (4) Es poden produir errors agregats importants quan la representació espacial de sistemes no lineals és inadequada.
- (5) La variabilitat espacial de problemes com el canvi climàtic queda oculta en un anàlisi espacial altament agregat, diluint possibles conseqüències socials i ambientals greus.
- (6) L'eficàcia de les estratègies específiques d'adaptació poden variar entre regions.
- (7) A escala regional els factors culturals i socials adquireixen més importància front als de caire econòmic i mediambiental que potencien els models a escala global.
- (8) L'estudi de sistemes "marginats" (segments de població altament vulnerables al canvi climàtic) és possible a escala local, mentre no és factible a una escala altament agregada.
- (9) Es pot requerir de polítiques regionals diferenciades per fer front a problemes de caire global.

- (10) Enllaçant estudis a escala regional i global s'obté major informació que la proporcionada per la suma de les parts.

També en el camp de la modelització de sistemes energètics, el nivell d'escala en el que es desenvolupa l'anàlisi és 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 & Jewell 2011).

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

2.3.2 Models de planificació energètica

La modelització i el mètode d'escenaris, han estat des de mitjans de la dècada dels anys 70, eines àmpliament utilitzades en la planificació energètica nacional. 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 temes 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 & Gallachóir 2013). Existeixen un bon nombre de models d'energia, diferenciats en funció del propòsit, estructura, enfocament analític, cobertura geogràfica, sectors considerats, etc. El present estudi es centra en els principals models actualment en ús, i construïts específicament per 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" i "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 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 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 subestimin el potencial de l'eficiència energètica	No tenir en compte el mercat (costos ocults i altres limitacions), fa que sobreestimin el potencial de l'eficiència energètica
Determinen la demanda energètica a través d'agregats macroeconòmics, però estudien l'abastiment d'energia	Representen les tecnologies d'abastiment energètic en detall i de forma desagregada, però estudien la

amb diferents metodologies	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 feble

Taula 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 que canvis en determinades activitats provocarien. 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 models 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. La Fig. 6 presenta les categories principals de models d'energia, partint de la categorització clàssica “top-down” i “bottom-up”.

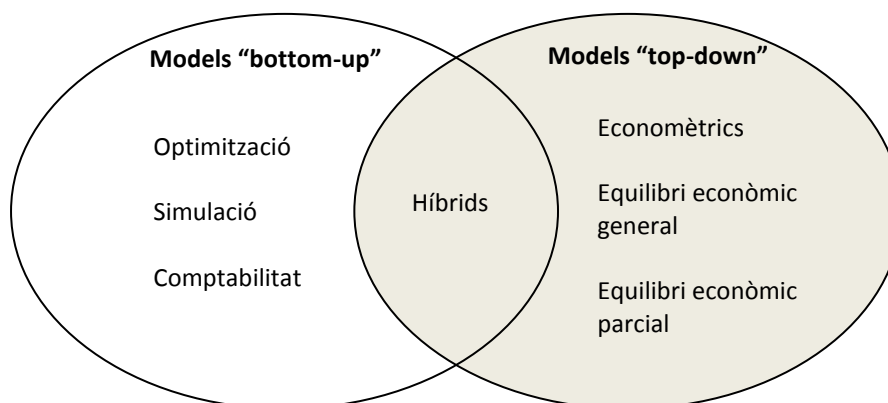


Fig. 6. Categories principals de models d'energia

És important remarcar que aquesta classificació no és estrictament aplicable a tots els models, i que alguns dels més avançats combinen diferents característiques de les 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 actuals, 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 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	Top-down/ Equilibri econòmic parcial	Fins l'any 2095	5 anys	PNNL http://www.globalchange.umd.edu
MESSAGE	Global/ regional	Bottom-up/ Optimització	Fins l'any 2100	10 anys	IIASA http://www.iiasa.ac.at
PRIMES	Unió Europea	Bottom-up/ Top-down/ Equilibri econòmic parcial	Màxim 50 anys	Anual	NTUA http://www.e3mlab.ntua.gr
MARKAL/TIMES	Global/regional/ Nacional/local	Bottom-up/ Optimització/ Equilibri econòmic parcial	Fins l'any 2100	Definits per l'usuari	ETSAP, IEA http://etsap.org
LEAP	Global/ regional/ nacional/ local	Bottom-up/ Comptabilitat/ Optimització	Il·limitat	Anual	SEI http://www.energycommunity.org
EnergyPLAN	Regional/ nacional/ local	Bottom-up/ Optimització	1 any ¹	Horari	Aalborg University http://www.energyplan.eu

Taula 2. Característiques principals dels models d'energia presentats

¹ Només és capaç de generar els resultats per un any determinat. Varies simulacions poden ser combinades per tal de construir escenaris amb l'horitzó temporal desitjat

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 del món, representat 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 GEH 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 tres sectors de consum final: edificis, indústria i 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 depenent 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 depenent dels costos ambientals (JGCRI/PNNL 2012).

GCAM ha estat utilitzat per analitzar la viabilitat d'estabilitzar les emissions de GEH (gasos d'efecte hivernacle) l'any 2100, investigar les potencialitats del sector del transport en la reducció de GEH, i per l'estudi dels requeriments tecnològics i econòmics en funció de diferents nivells 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. 7). 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).

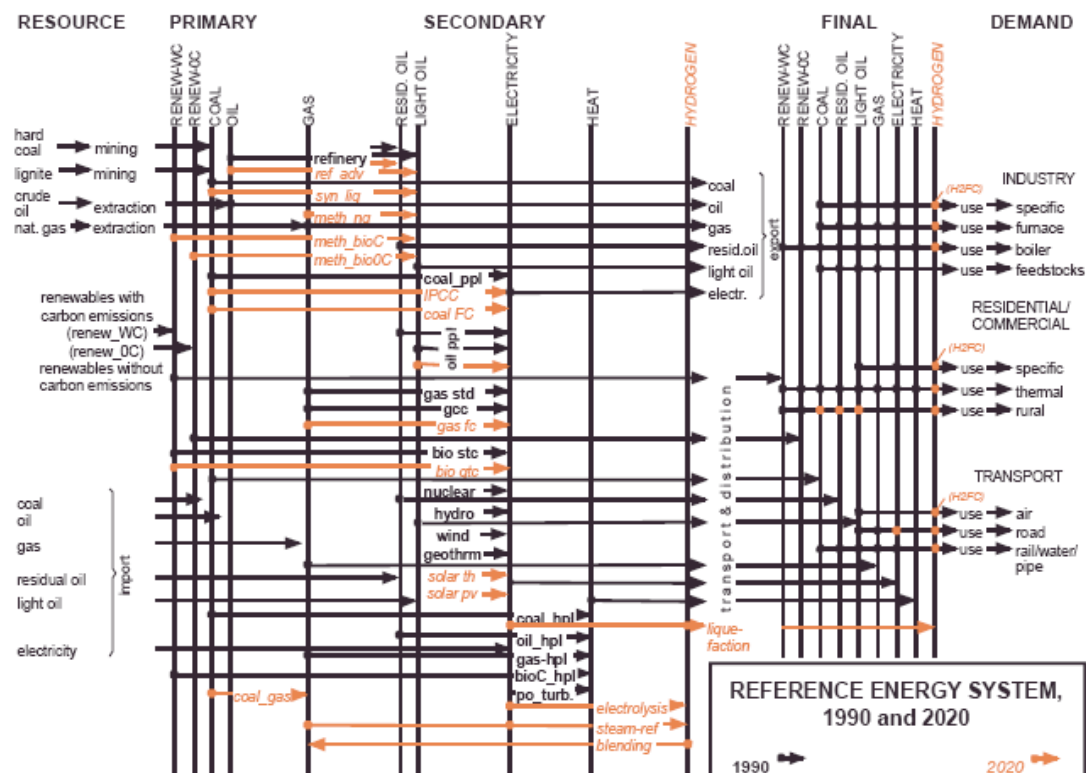


Fig. 7. Esquema de l'estructura d'un sistema energètic bàsic del model MESSAGE. Font: IIASA 2012

El model global MESSAGE està format per 11 macro-regions (Amèrica del Nord, Europa Oest, Pacific 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. 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 és estimada 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. 8, en el punt d'equilibri, l'abastiment d'energia coincideix exactament amb la quantitat demandada pels consumidors (Loulou et al. 2004).

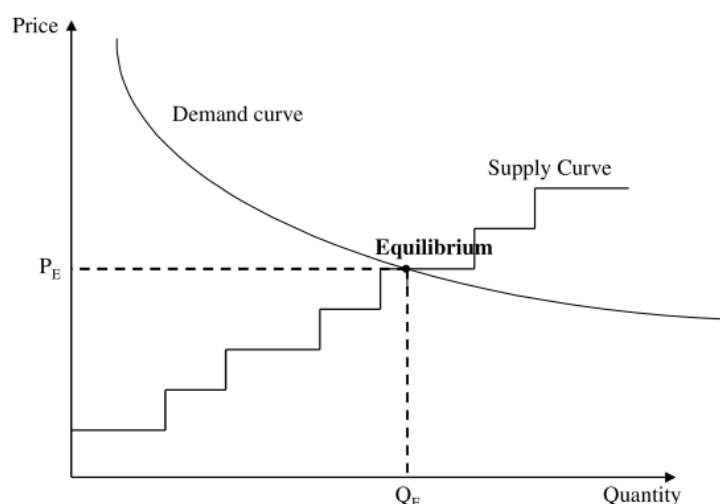


Fig. 8. Equilibri en el cas d'un servei energètic. Font: Loulou et al. 2004

MARKAL disposa de múltiples opcions per modelitzar característiques específiques del sector energètic, com l'internalització d'externalitats, la representació de l'aprenentatge tecnològic de forma endògena i la simulació de l'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-EFOM² 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

² EFOM ("Energy Flow Optimization Model") és un model "bottom-up" en el qual TIMES està basat.

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). La Comissió Europea utilitza TIMES per l'avaluació de la "Renewable Energy Strategy 2020" (RES2020³), inicialment a través del model PET ("Pan European TIMES") i recentment mitjançant el model JRC-EU-TIMES (Simoes et al. 2013).

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 al "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 també 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, permetent també incorporar dades de models més especialitzats. L'última versió de LEAP (LEAP2011) incorpora també un mòdul d'optimització lineal de la xarxa elèctrica basat en el programari de codi obert OSeMOSYS⁴ (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 són calculats amb un nivell de detall més precís. 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 i 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.

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.

³ <http://www.cres.gr/res2020/>

⁴ OSeMOSYS ("Open Source Energy Modelling System")

La planificació energètica nacional, és segurament l'aplicació més generalitzada de LEAP fins al moment, amb estudis publicats a Xina (Guo et al. 2003), Estònia (Dementjeva & Siirde 2010), Japó (Takase & 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). Recentment, s'ha publicat el primer article fent ús de la nova eina d'optimització lineal integrada en la versió més recent de LEAP, on es construeix l'escenari òptim d'abastiment d'energia elèctrica a Irlanda (Rogan et al. 2013). Per últim, tot i que generalment LEAP és utilitzat per l'anàlisi parcial o total 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, i el període de vida i taxes d'interès. Les característiques bàsiques del sector energètic representat en el model es mostren en el diagrama de la Fig. 9. 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.

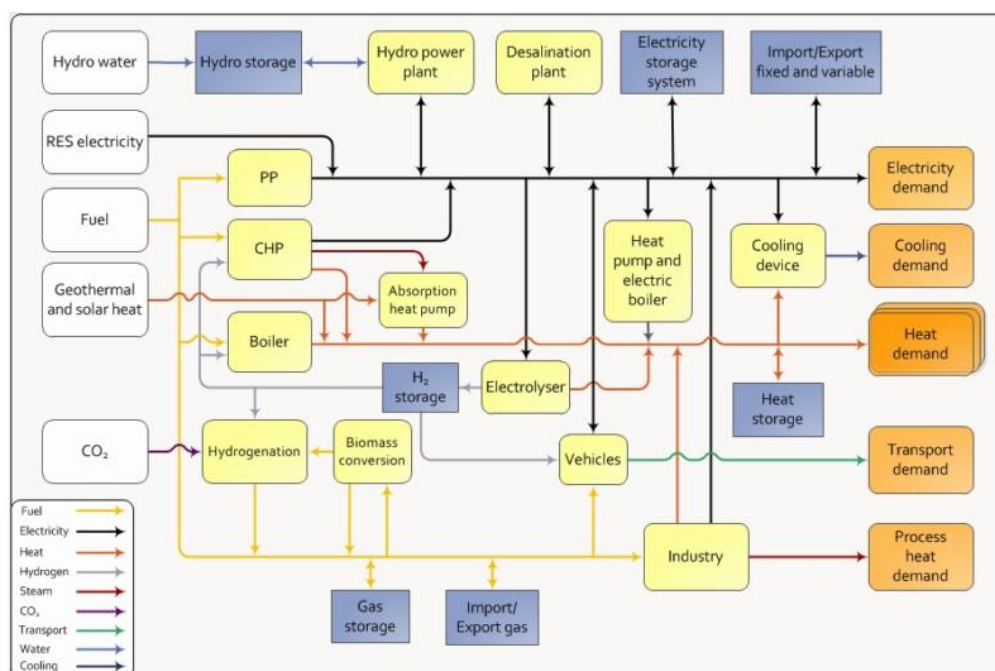


Fig. 9. Diagrama representatiu del sector energètic modelitzat en el model EnergyPLAN. Font: Lund 2013

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 & Mathiesen 2009) i Irlanda (Connolly et al. 2011).

Tots els models exposats en aquest apartat poden ser utilitzats per exercicis de planificació energètica i anàlisis 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 detall 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 conduixin 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.

2.4 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 per al sector armamentístic. Finalitzada la Segona Guerra Mundial, el context de Guerra Freda manté la importància del petroli per sostenir els exèrcits, però aquest 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 condueix 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) fomentar un mercat global de productes petrolífers evitant concentrar el poder en un únic actor i (3) creació de l'Agència Internacional de l'Energia per coordinar respostes dels països de la OCDE (Organització per a la Cooperació i el 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 paraitzar 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 zènit 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. 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 en 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 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 naturals i tècnics predictibles	Factors diversos i parcialment impredecibles
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 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 dels 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. 10 mostra el marc en seguretat energètica definit per Cherp & Jewell (2011) i com les respostes de protecció front a riscos tendeixen a integrar les tres perspectives.

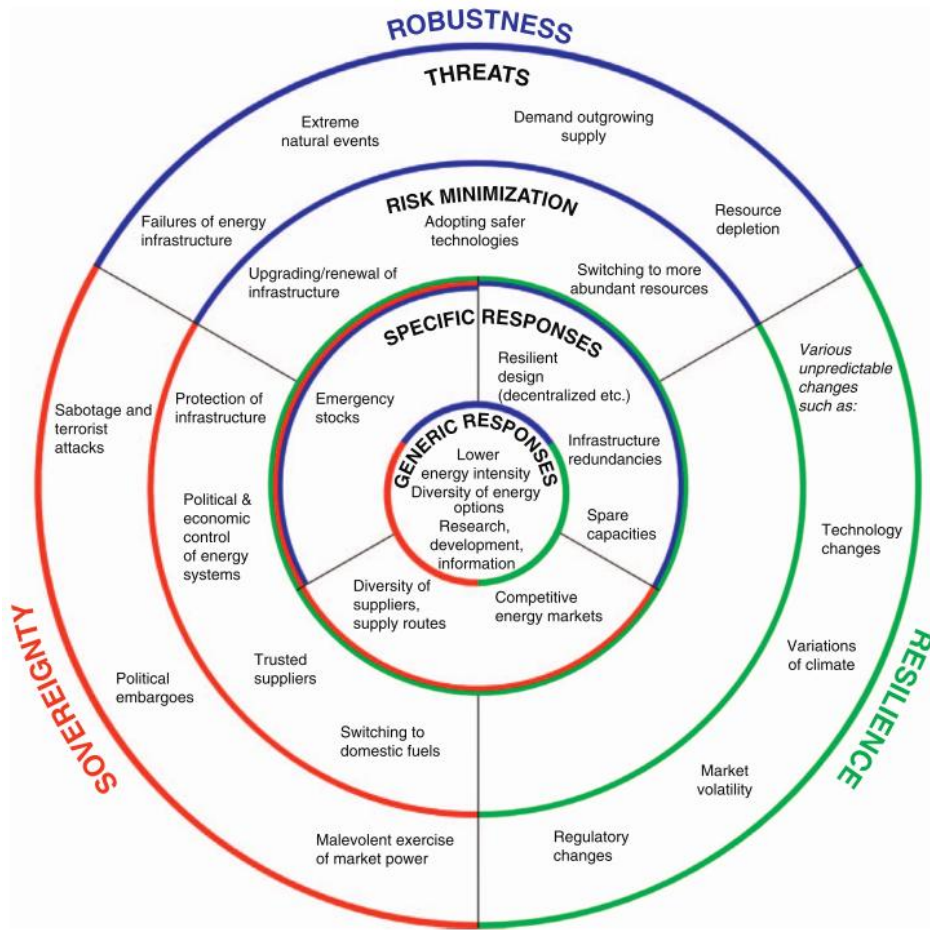


Fig. 10. Integració de les 3 perspectives en seguretat energètica. Font: Cherp & Jewell 2011

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 energètic⁵ 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 que, la seguretat d'abastiment no pretén maximitzar l'autonomia energètica o minimitzar la dependència, sinó reduir els riscos derivats d'aquesta última.

⁵ En aquest cas, i en molta altra literatura, el concepte seguretat d'abastiment energètic és utilitzat com a sinònim de seguretat energètica

3 Objectius de la tesi

3.1 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.

3.2 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**
 - 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, del fòssil a l'elèctric.
- 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.

4 Metodologia

L'eix central de la tesi doctoral, i també la part que requerirà de més recursos, consisteix en la implementació del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra. En paral·lel es treballarà en la definició del marc conceptual de la seguretat energètica adaptat a la realitat andorrana que permetrà realitzar una primera avaluació de l'estat actual i serà també imprescindible per a la fase final de la tesi, que consistirà en l'anàlisi dels escenaris futurs resultants del model.

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

Aquesta primera fase, es planteja identificar un mètode apropiat per tal d'avaluar la seguretat energètica actual i futura d'Andorra. En aquest sentit, caldrà que aquest sigui compatible amb la representació quantitativa del futur que es derivarà del model integrat i tingui validesa per a sistemes energètics futurs, que poden ser radicalment diferents de l'actual.

La metodologia seguida serà la desenvolupada per Jewell et al. (2014), on 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 2.3.2), motiu pel qual, en l'aplicació a Andorra caldrà tenir en compte la diferència d'escala i les particularitats del país.

Com a primer pas, defineix la seguretat energètica com: *baixa vulnerabilitat dels sistemes energètics vitals*, essent una definició suficientment flexible per poder ser aplicada en diverses situacions i incloent als sistemes energètics futurs. S'entén per sistemes energètics vitals, aquells que poden alterar l'estabilitat de la societat en cas de fallida. El segon pas en la construcció del marc d'avaluació de la seguretat energètica és 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 segons la seva relació a cada una de les perspectives genèriques en seguretat energètica nascudes durant l'últim segle: sobirania, robustesa i resiliència (veure secció 2.4).

4.1.1 Indicadors

Per tal d'avaluar la seguretat energètica s'utilitzaran indicadors, representant 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 treballarem, podran ser incorporats indicadors representant aquesta perspectiva.

Partint dels indicadors proposats per ser utilitzats conjuntament amb models d'avaluació integrada (Jewell et al. 2012; Jewell et al. 2014), se n'identificaran un conjunt aplicables a

escala nacional i a priori calculables per Andorra. Es partirà d'una selecció inicial d'indicadors que a mesura que avanci el procés es complementarà en funció de les vulnerabilitats identificades.

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

La transició cap a un model energètic més segur i alhora més sostenible és un repte complicat per a nombrosos països. La situació de vulnerabilitat actual d'Andorra i les seves particularitats dificulten encara més aquest objectiu. Identificar els efectes que diferents estratègies tindrien sobre el sistema energètic i el país en general, és un pas vital per iniciar aquesta transició. Amb aquest objectiu, es construirà un model integrat d'avaluació de la seguretat energètica que permetrà simular la situació energètica actual i desenvolupar escenaris de futur sota diferents assumpcions. L'eina integrada de modelització LEAP⁶ ("Long range Energy Alternatives Planning System") ha estat escollida per tal de crear el model on es caracteritzaran 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, la majoria de les existents no són de caràcter públic pel que la disponibilitat de dades per iniciar la recerca és 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 ens permetrà partir d'anàlisis simples, i a mesura que la disponibilitat de dades augmenti, afegir detall i complexitat en el 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.

L'escala temporal anual amb la que treballa LEAP en la major part dels càlculs, fa que sigui una eina molt útil per a la construcció d'escenaris a llarg termini, però menys per a estudis que requereixin l'anàlisi de fluctuacions d'energia a més petita escala. En aquesta tesi, la prioritat és l'anàlisi a llarg termini, tot i que es considerarà la possibilitat de fer ús d'algun altre model en cas de requerir de més detall en l'anàlisi d'algun aspecte específic. Des de la perspectiva dels Models d'Avaluació Integrada, 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. En el nostre cas, degut a l'escala en que treballem podem considerar que aquest factor és poc significatiu.

La construcció del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra representa l'eix central d'aquesta tesi. El model estimarà l'evolució del sistema energètic andorrà des de l'actualitat fins l'any 2050, amb un interval temporal d'un any. El model combinarà 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 modelització del consum i l'abastiment d'energia, formen els dos mòduls principals del sistema. El model constarà d'una sèrie d'assumpcions macroeconòmiques que seran tractades com a variables exògenes. Les noves tecnologies seran tractades també com a dades d'entrada, i les seves característiques actuals i futures (capacitat, eficiència, cost, cicle de vida, emissions) es basaran en dades d'organismes internacionals i correccions puntuals, quan siguin necessàries, pel territori andorrà. En tot moment, el mòdul d'abastiment ha de proporcionar l'energia

⁶ En la secció 2.3.2 es detallen les característiques i aplicacions destacades de LEAP

demandada pel sistema recolzant-se en els recursos propis i en les importacions. Les externalitats ambientals de cadascun dels mòduls seran representades mitjançant les emissions contaminants i l'ús del sòl, formant part de l'anàlisi cost benefici de cadascun dels escenaris resultants. Per últim, el model permetrà 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 giraran entorn les tres línies prioritàries identificades en el Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra: estalvi, eficiència i energies renovables (Govern d'Andorra 2012). La Fig. 11 mostra l'estructura principal del model LEAP a implementar.

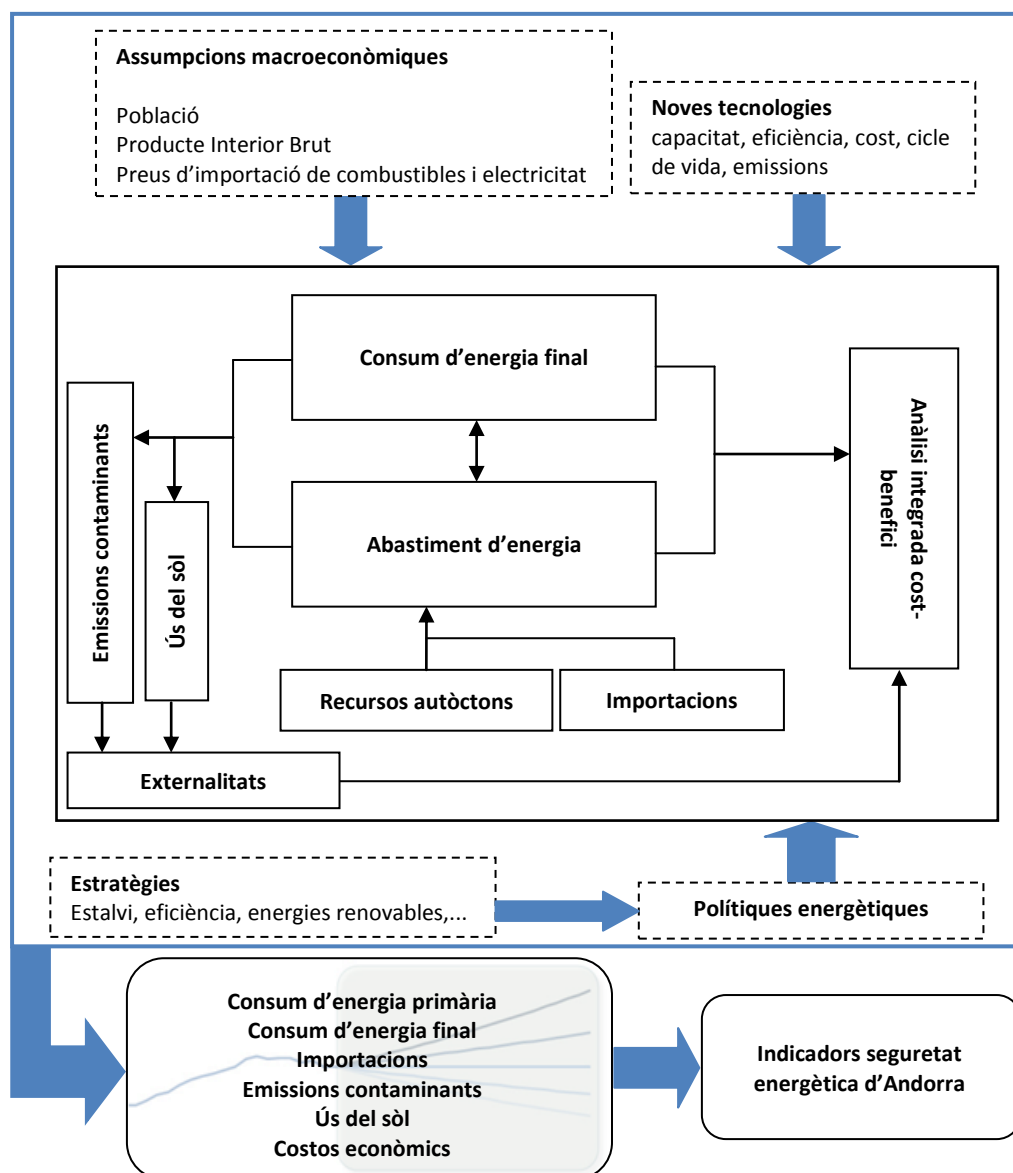


Fig. 11. Estructura del model integrat d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra

A continuació s'aprofundeix en la caracterització dels dos mòduls principals del model: consum i abastiment d'energia.

4.2.1 Modelització del consum d'energia final

El mòdul de consum d'energia final es construeix per tal d'estimar l'evolució del consum energètic des de l'actualitat fins l'any 2050. És interessant obtenir un valor absolut anual de consum d'energia, tot i que l'autèntic repte del model és caracteritzar-lo, aconseguint identificar i desglossar la procedència dels principals àmbits de consum energètic del país. Aquest serà un model amb un alt detall tecnològic en els sectors en que la disponibilitat de dades ho permeti, factor que permetrà més endavant l'anàlisi de la potencialitat de diverses opcions tecnològiques. La metodologia per tal d'implementar el model de consum energètic a un horitzó 2050 es pot resumir en els següents punts:

- (1) Identificació dels principals sectors de consum energètic del país.
- (2) Desagregat de cadascun dels sectors principals en àmbits i subàmbits que els formen, així com tecnologies i fonts d'energia que utilitzen (veure Fig. 12).
- (3) Recopilació de dades tècniques, socioeconòmiques i ambientals relacionades amb l'energia a nivell internacional i particulars d'Andorra.
- (4) Estimació del consum de cada sector i pronòstic de l'evolució d'aquest.
- (5) Integració de cadascun dels sectors en el model LEAP.
- (6) Calibratge del model amb les dades existents del departament d'estadística del Govern d'Andorra i FEDA.

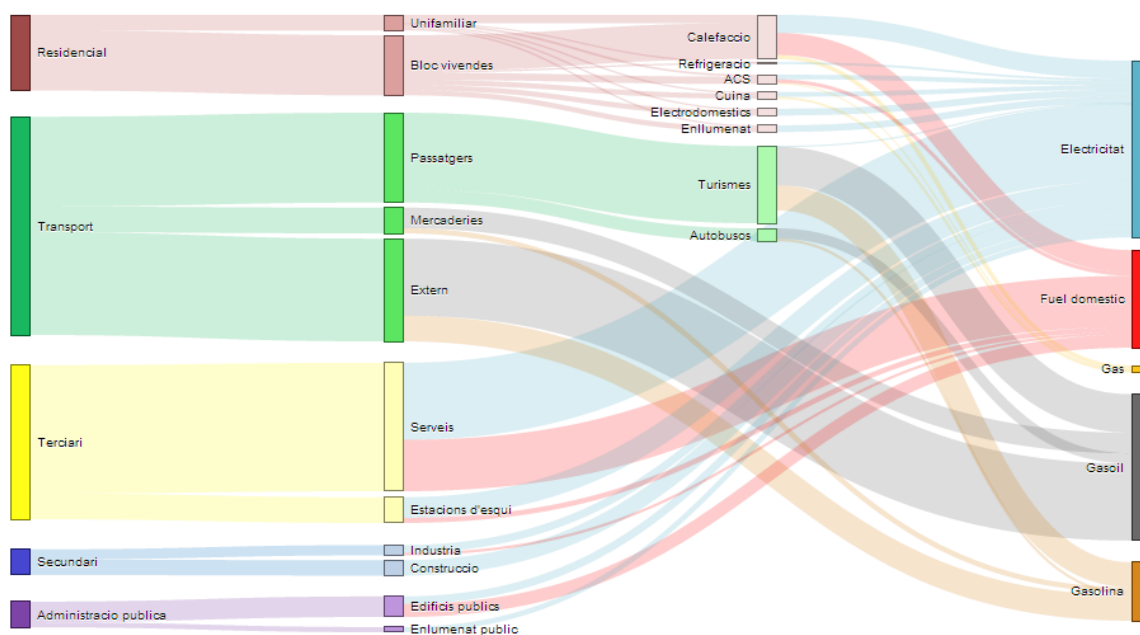


Fig. 12. Diagrama de Sankey del consum d'energia final a Andorra. Infografia: Excel to Sankey (Bruce McPherson)

La població, el PIB (Producte Interior Brut), el preu de les diferents fonts energètiques, la productivitat dels sectors i el parc de vivendes, són els principals factors que determinaran l'evolució històrica del consum d'energia final. Aquest es projectarà fins l'any 2050 per sector (j), font d'energia utilitzada (f) i any (t), seguint l'equació següent (Simoes et al. 2013):

$$EF_{jft} = EF_{jft(t-1)} \cdot (1 + \Delta FI_{jt} \cdot E_j) \cdot (1 + \Delta P_{jft} \cdot Ep_j)$$

On:

EF_{jft} és el consum d'energia final

ΔFI_{jt} representa l'evolució del factor impulsor del consum

E_j és l'elasticitat respecte el factor impulsor

ΔP_{jft} descriu la variació de preu associada a la font d'energia utilitzada

E_{pj} és l'elasticitat respecte al preu

Els factors impulsors del consum, així com les elasticitats a aquests factors i als preus de les fonts d'energia seran extrets de dades històriques d'Andorra i de la literatura existent (Brons et al. 2008; Simoes et al. 2013). L'estimació del consum en l'any base EF_{jfo} , es calcularà utilitzant diferents metodologies en funció del sector i basant-se en els històrics de consum existents.

Residencial

El sector domèstic representa una part molt important dins el consum energètic global del país, concretament en l'àmbit elèctric representa un 21,3% del consum total. Per aquest motiu resulta de vital importància poder desglossar el consum energètic de les llars andorranes en els àmbits i subàmbits més rellevants que el formen. Aquest, és un sector complex de caracteritzar, degut a la diversitat de consums existents i a que en ell hi influeixen factors socials, estils de vida, condicions ambientals i condicionants socioeconòmics que fan més complicada la seva caracterització i encara més pronosticar-ne l'evolució. El sector domèstic permet un ampli ventall d'actuacions en polítiques d'estalvi energètic, motiu pel qual és important modelitzar-lo amb un alt detall tecnològic.

En la Fig. 12, es pot veure desglossada l'estructura del consum d'energia final de les llars andorranes:

- 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 la calefacció, igual que l'Aigua Calenta Sanitària (ACS) i la cuina es poden emprar diferents fonts energètiques.
- Refrigeració. Cal destacar que en un primer moment no es tindrà en consideració aquesta variable ja que s'estima que té un pes poc important degut a les condicions climatològiques del país. De totes maneres s'ha volgut introduir en el sistema a fi de poder anar afinant a posteriori i poder considerar tant efectes del canvi climàtic com canvis en les costums dels ciutadans (temperatura de confort).
- ACS. Aigua destinada a consum humà (potable) que requereix ser escalfada. Pot emprar diferents fonts d'energia.
- Cuina. Aquesta despesa energètica present a totes les cases pot emprar diferents fonts d'energia.
- Electrodomèstics. Aquest subàmbit inclou tant l'entès comunament com electrodomèstics (rentadora, nevera, rentavaixelles,...), com qualsevol altre aparell elèctric utilitzat a la llar (ordinador, televisió, ràdio,...).
- Enllumenat. En els darrers anys la il·luminació ha conegut importants canvis tecnològics que permetran en el futur un significatiu estalvi energètic en aquest àmbit.

La vivenda es considerarà com la principal unitat consumidora del sector residencial. Així doncs serà important caracteritzar el parc de vivendes actual i preveure'n la seva evolució. La metodologia utilitzada s'inspirarà en el model UKDCM ("The UK Carbon Domestic Model"), mostrat en la Fig. 13 i detallat en Kavgić et al. (2010). Les vivendes post-2010 seran tractades de forma independent degut a les mesures d'eficiència energètica introduïdes amb l'entrada en vigor del Reglament Energètic de l'Edificació (BOPA 1/10/2010).

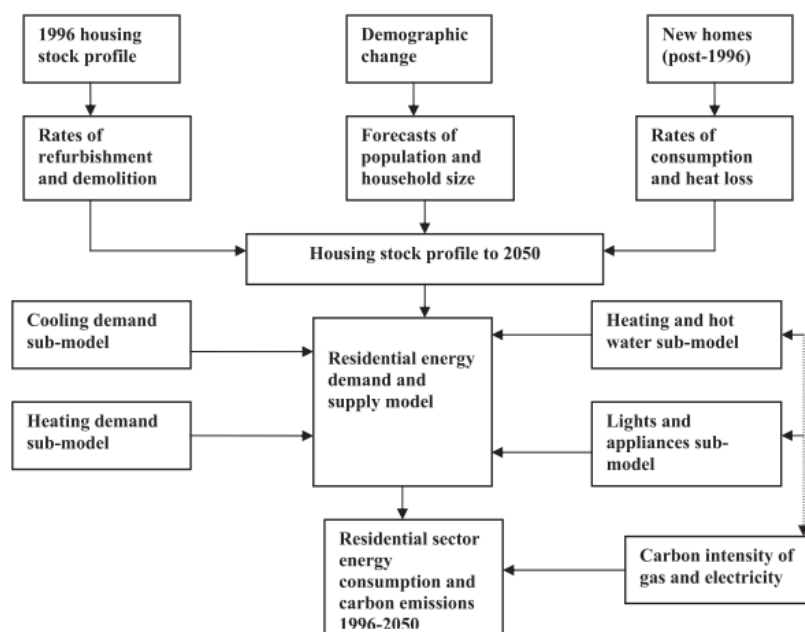


Fig. 13. Estructura del model UKDCM. Font: Kavgic et al. (2010)

El consum en l'any base s'estimarà partint de diferents metodologies segons els àmbits. La calefacció i l'ACS es calcularan a partir dels mètodes definits en el "Código Técnico de la Edificación" (Ministerio de Fomento 2013) fent ús de les dades d'irradiació, els graus dia i la temperatura de l'aigua de la xarxa de subministrament del principal nucli habitat del país, Andorra la Vella. Per la resta d'àmbits, i a falta de dades específiques d'Andorra es partirà de l'informe final de l'anàlisi del consum energètic del sector residencial a Espanya (IDAE 2011).

Per tal de d'avaluar el potencial de noves opcions tecnològiques, és important disposar d'informació detallada de les tecnologies actualment en ús a les llars. Aquestes dades no existeixen en l'actualitat pel que es realitzarà una enquesta per tal d'estimar l'eficiència energètica dels principals aparells consumidors d'energia existents.

Transport

A Andorra, el consum energètic relacionat amb el transport ha augmentat considerablement en les últimes dècades, limitant-se únicament al transport per carretera. El país ha passat d'importar 111 milions de litres de carburant de locomoció l'any 1993 a gairebé 130 milions de litres al 2013 (Departament d'Estadística 2014). El sector del transport és el major consumidor d'energia primària del principat (39%) i principal font emissora de gasos contaminants a l'atmosfera, responsable d'entre el 42% i el 68% d'emissions de CO₂, segons la metodologia de recompte d'emissions emprada (Govern d'Andorra 2012). Val a dir que aquest consum no tan sols està relacionat amb el consum intern, sinó que una part correspon als turistes que visiten el país. Per tant caldrà discriminar el consum referent als turistes que omplen el dipòsit abans de sortir del país aprofitant el diferencial de preu respecte els països veïns. El pes del transport en el sistema energètic andorrà justifica l'anàlisi d'aquest amb major profunditat que en els altres sectors estudiats.

El consum energètic del transport està determinat per les pròpies característiques dels vehicles, les condicions de trànsit i de la carretera, l'estil de conducció i les condicions ambientals. Degut a això, existeix una escletxa important entre el consum estimat pels testos

legislatius actuals i els consums reals (Tzirakis et al. 2006). L'accidentada orografia de les carreteres andorranes, factor obviat en els testos legislatius, suggereix que aquest salt entre consums estimats i consums reals pugui ser molt accentuat a Andorra. Per quantificar aquest salt, conegut com a "on road factor", es simularà el comportament energètic de diferents tecnologies de vehicles en una ruta tipus del país sota diferents assumpcions de trànsit i estil de conducció. Com a aportació innovadora, aquesta tesi modelitzarà el comportament dels vehicles elèctrics en territoris de muntanya, estudiant particularment l'efecte dels pendents en el consum energètic.

Paral·lelament, es treballarà en la construcció d'un model d'estoc del parc automobilístic del Principat, partint de les dades d'altres de vehicles i les inspeccions tècniques realitzades des de 1951 (Departament d'Indústria 2014). Inspirant-se en la metodologia desenvolupada per Daly & Ó Gallachóir (2011) es modelitzarà el parc de turismes actual, tenint en compte la seva cilindrada, edat, combustible utilitzat, i quilòmetres realitzats, i projectant-ne el seu consum associat. Aquest nivell de detall en la caracterització de l'estoc de vehicles permetrà realitzar una avaluació més acurada de les polítiques en el sector del transport. Concretament s'estudiaran els impactes d'una introducció massiva del vehicle elèctric i específicament de l'efecte que podria tenir sobre la infraestructura de transport i distribució elèctrica existent.

Altres sectors

Juntament amb el sector industrial, el transport de passatgers i el sector domèstic són els principals consumidors d'energia en els països analitzats per l'Agència Internacional de l'Energia (IEA 2007). La particularitat d'Andorra, en que el sector secundari és pràcticament inexistent, fa pensar que gran part del consum energètic del país estarà associat al transport i a les llars, sectors que s'analitzaran en detall en aquesta tesi. De totes maneres, existeixen també consums a tenir presents en altres sectors per tal de modelitzar el sistema energètic en el seu conjunt. Amb aquest objectiu es caracteritzaran el sector *secundari*, amb un pes molt minoritari dins l'economia andorrana i el *terciari*, principalment representat per les estacions d'esquí i els serveis. El consum de l'*administració pública* s'analitzarà en detall gràcies al recent acord de l'OBSA per la realització del Pla d'Eficiència i Estalvi Energètic del Comú d'Andorra la Vella.

4.2.2 Modelització de l'abastiment d'energia

L'abastiment d'energia de LEAP, simula la conversió d'energia primària i el transport d'aquesta fins al punt de consum final. Està format per mòduls utilitzats per modelitzar l'oferta i conversió d'energia, tals com la generació elèctrica, la refinació o la producció de carbó vegetal. Cadascun dels mòduls, conté un o més processos que representen una tecnologia en particular. Els processos produeixen una o més fonts de sortida que representen els productes energètics obtinguts. Els processos es duen a terme mitjançant una o més fonts d'energia d'entrada, a més de fonts auxiliars, representant energia auxiliar consumida en el propi procés (per ex. l'electricitat en la refinaria de petroli). Per cada procés es detallen les seves característiques, incloent aspectes com els costos, l'eficiència, el temps de vida, la capacitat, etc. L'energia final proporcionada pel diferents mòduls ve condicionada pel mòdul de consum prèviament modelitzat. En cas de no generar-se la font d'energia final dins el propi sistema energètic les unitats necessàries per abastir la demanda són considerades importacions. A continuació, en la Fig. 14 es mostra l'estructura bàsica d'un mòdul d'abastiment d'energia de LEAP.

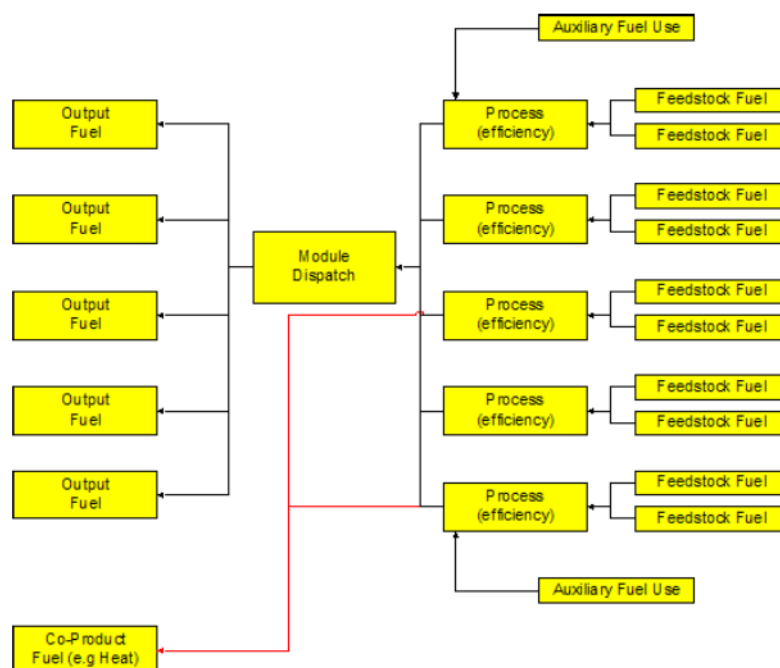


Fig. 14. Estructura general d'un mòdul d'abastiment d'energia en LEAP. Font: SEI 2011

En el cas concret d'Andorra, únicament part de l'electricitat és generada de forma autòctona, important la resta de fonts secundàries d'energia (gas, gasoil, gasolina i fuel domèstic). A més, el 83% de l'energia elèctrica s'importa a parts pràcticament igual de França i Espanya (Govern d'Andorra 2012). En aquest sentit, l'abastiment d'energia estarà format principalment pel mòdul de generació elèctrica i el de transmissió i distribució, representant les pèrdues en aquest procés. El mòdul d'abastiment d'energia elèctrica, representat en la Fig. 15, inclourà tant les tecnologies existents com les potencials d'introduir-se en un futur per tal d'incloure-les en l'anàlisi d'escenaris. A diferència del que és habitual en LEAP, les importacions d'electricitat procedents d'Espanya i França seran tractades com dos processos diferenciats, permetent així caracteritzar en detall els costos de cada un, copsar-ne les diferències i formar així part del posterior anàlisi d'alternatives i estratègies.

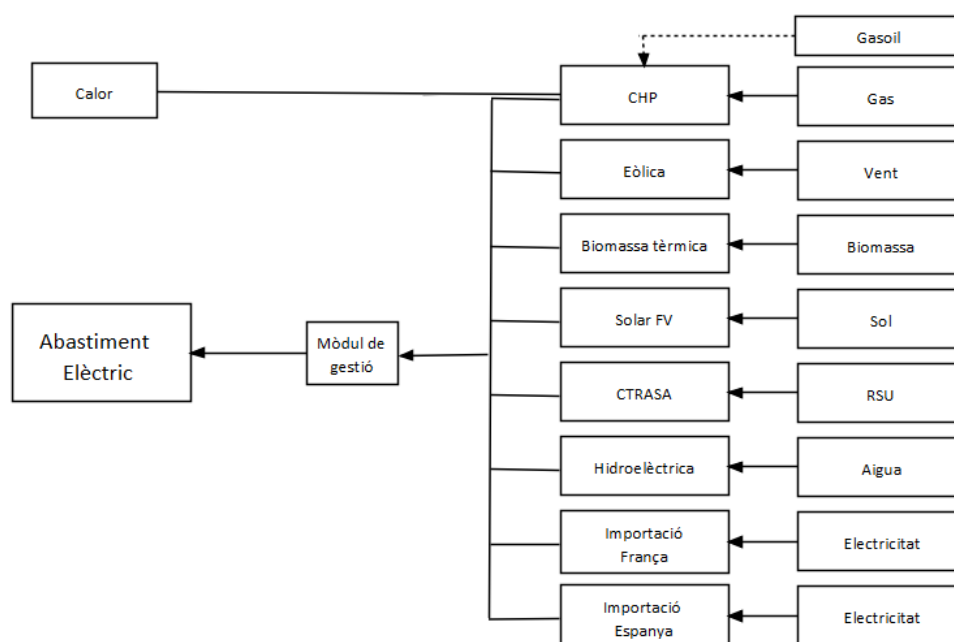


Fig. 15. Diagrama del mòdul LEAP d'abastiment elèctric d'Andorra

La disponibilitat de fonts d'energia renovable per abastir les tecnologies de generació, es basarà en les estimacions de potencial de les diverses fonts realitzades en el Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra (Govern d'Andorra 2012).

En la seva última versió, LEAP inclou la capacitat de calcular automàticament la capacitat d'expansió de mínim cost del sector elèctric. Aquesta nova funció és gràcies a l'integració de l'eina d'optimització de codi obert OSeMOSYS. Així doncs es compararan els costos de generació elèctrica incloent la inversió, l'operació i manteniment i els costos de combustibles de les diferents tecnologies de generació, paràmetres a partir dels quals es realitzaran estudis de sensibilitat. S'inclouran addicionalment, costos associats a les externalitats ambientals de contaminació local i global. En mode d'optimització, LEAP calcularà l'expansió del sistema de generació que minimitzi el cost total del sistema. Finalment, s'exploraran l'efecte sobre el conjunt de les tecnologies escollides i el cost total dels escenaris d'imposar restriccions en la generació elèctrica (per ex. límit d'emissions, pes mínim d'energies renovables, etc.). Val a dir que aquesta nova característica de LEAP fa poc temps que ha estat integrada i està encara en mode experimental. Tot i això, recentment s'ha publicat el primer article fent ús d'aquesta eina, mostrant l'avenç en la maduresa d'aquesta (Rogan et al. 2013). La Fig. 16 mostra el procés de generació de resultats de LEAP en mode optimització. És interessant remarcar que el procediment és igual que en mode simulació, però en aquest cas integra l'eina OSeMOSYS en el mòdul d'abastiment d'energia elèctrica.

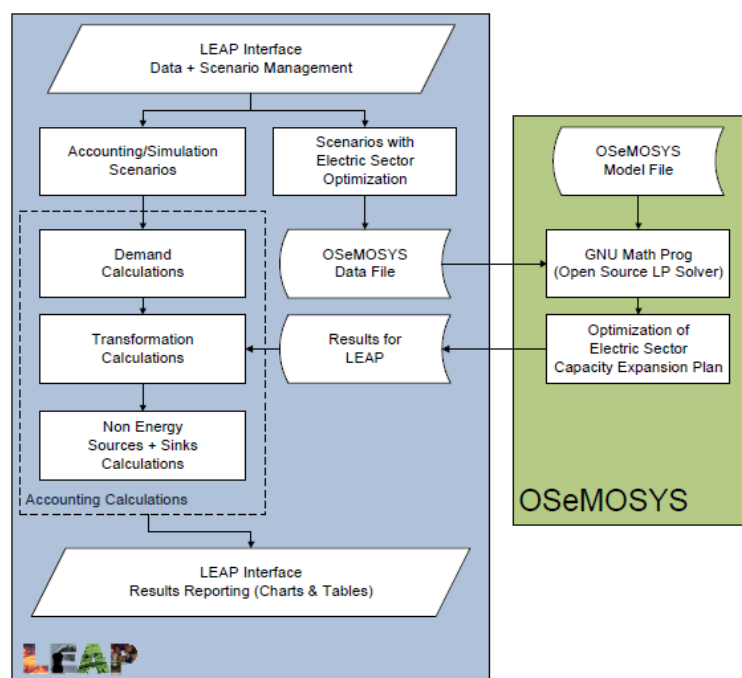


Fig. 16. Procés de generació de resultats de LEAP en mode d'optimització. Font: Heaps 2011

4.3 Anàlisi d'escenaris i avaluació de la seguretat energètica futura

L'aportació principal del model integrat serà la capacitat de realitzar un anàlisi d'escenaris, partint d'un escenari BAU ("business-as-usual") i implementant un seguit d'escenaris alternatius. El model simularà escenaris energètics de futur construïts sota diverses assumpcions i responent a la pregunta "Què passaria si...". A més de les dades directes disponibles, cada escenari combina un conjunt d'incerteses (desenvolupament tecnològic, creixement econòmic, preu de les fonts d'energia, etc.) i estratègies polítiques. La incertesa que envolta les assumpcions realitzades en els models complexos pot socavar la confiança en els resultats obtinguts (Simoes et al. 2013). Per tractar amb aquest factor, es realitzarà un anàlisi de sensibilitat dels paràmetres clau del model proporcionant informació útil sobre les incerteses i aportant solidesa als resultats.

En la fase final, es presentaran i s'analitzaran els resultats d'avaluar la seguretat energètica dels diferents escenaris futurs en base a la perspectiva integrada definida en la secció 2.4 i mitjançant els indicadors identificats prèviament. En última instància, l'anàlisi permetrà identificar polítiques i estratègies que contribueixin a fomentar la transició energètica d'Andorra cap a un model més sostenible.

5 Planificació, desenvolupament de la tesi i resultats obtinguts

5.1 Estat actual de la recerca

Durant els dos primers anys de la tesi, s'ha dedicat una atenció especial al sector del transport. La importància d'aquest en el sistema energètic andorrà i les incerteses que l'envolten, justifiquen el seu estudi de forma detallada. Paral·lelament s'ha treballat per tal d'assentar les bases d'aquesta tesi, definint el marc conceptual per a l'anàlisi de la seguretat energètica d'Andorra i identificant i testejant l'eina amb la que es modelitzarà el sistema energètic.

5.1.1 Avaluació inicial de la seguretat energètica

En aquesta activitat s'ha realitzat una aproximació a l'estudi de la seguretat energètica, identificant l'estructura del sistema energètic andorrà, descrivint algunes de les seves característiques més destacades i definint un primer grup d'indicadors aplicables tant en l'actualitat com en escenaris de futur.

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.

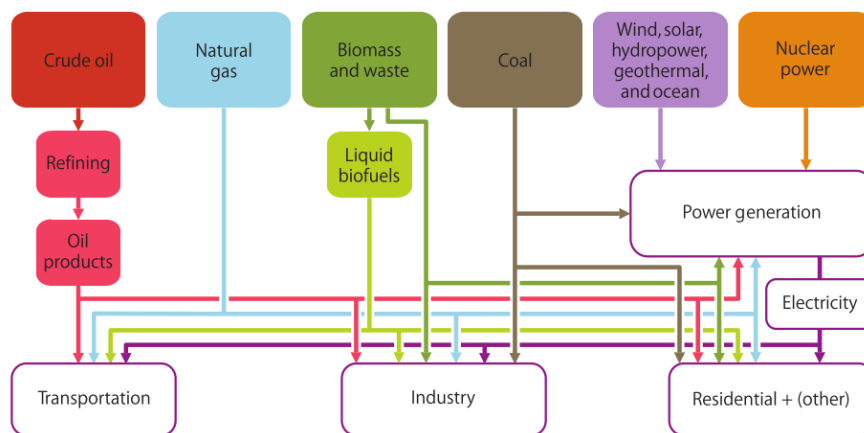


Fig. 17. Estructura general dels sistemes energètics. Font: Jewell 2011

L'enfocament presentat en la Fig. 17 és d'utilitat per tal d'identificar i entendre les fortaleeses 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. 17.

El diagrama de la Fig. 18 mostra el flux d'energia del sistema energètic d'Andorra. Pot apreciar-se com Andorra, a diferència de la major part de països europeus, no importa fonts d'energia primàries, ja que en l'actualitat no disposa d'infraestructura per tal de transformar-la. D'aquesta manera, importa directament fonts secundàries d'energia provinents d'Espanya i França. En el cas de l'electricitat, és importada 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.

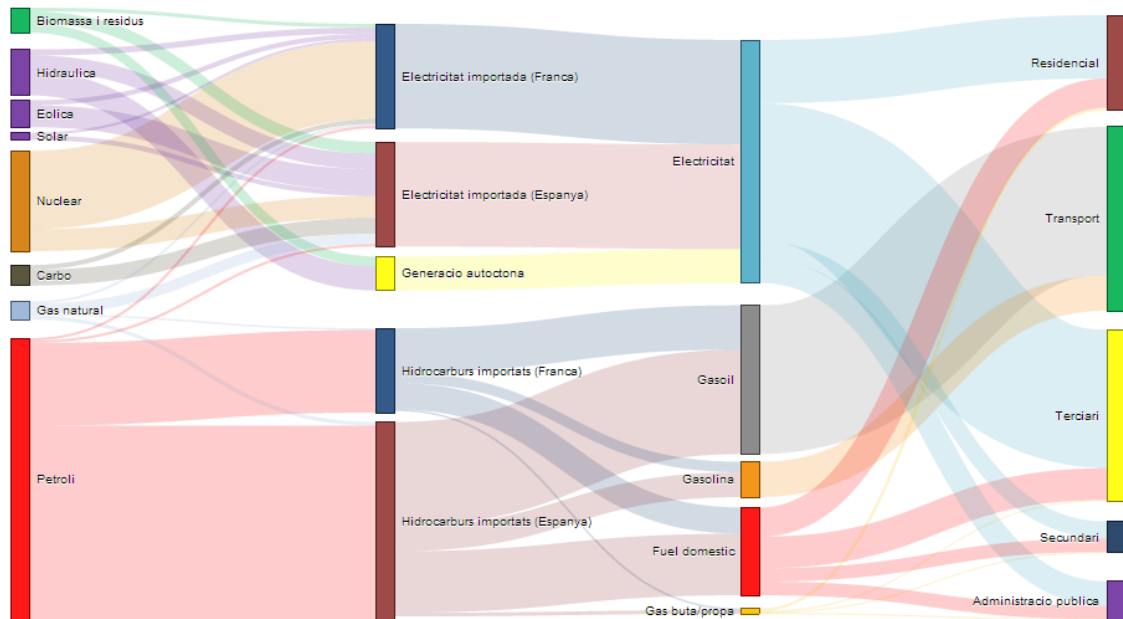


Fig. 18. Diagrama de Sankey representant el flux d'energia del sistema energètic d'Andorra. Infografia: Excel to Sankey (Bruce McPherson)

El consum total d'energia a Andorra ha incrementat de forma continuada durant el període 1993-2005 amb una mitja de creixement superior al 4% anual, moment en el que s'assoleix un pic en la demanda. Des de l'any 2005 s'aprecia un lleuger descens constant en el consum fins arribar en l'actualitat a valors pràcticament equivalents als de l'any 2002. La crisi econòmica i la disminució de la població, elements estretament relacionats a Andorra, es presenten com els principals factors responsables d'aquest constrenyiment del consum. La Fig. 19 mostra l'evolució del consum energètic (expressat en energia primària) durant el període 1993-2013 (Departament d'Estadística 2014).

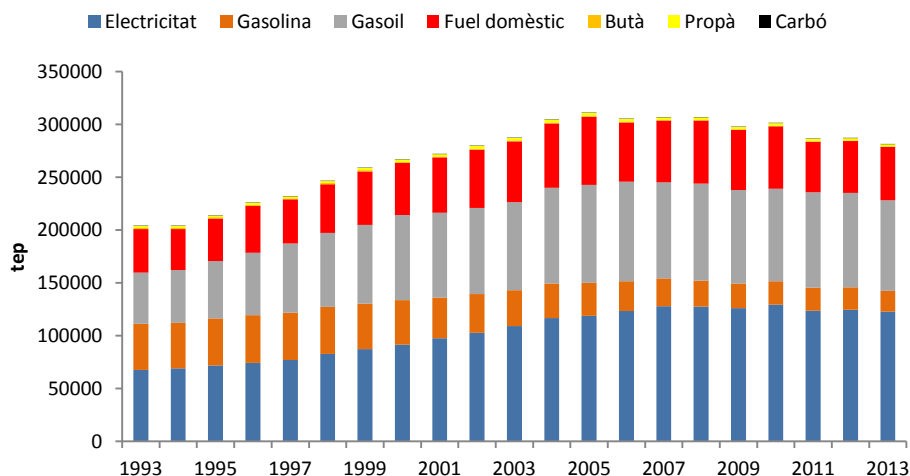


Fig. 19. Consum total d'energia a Andorra (expressat tones equivalents de petroli d'energia primària)

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 55% de l'energia primària del país, sense contabilitzar 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. Cal assenyalar, que en un futur proper augmentarà la importància del gas natural dins els mix energètic, ja que s'han iniciat varis projectes de centrals de cogeneració mitjançant aquest combustible.

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, segons les últimes dades publicades del 2011, la generació interna va representar únicament el 16,4% del consum elèctric del país, aportat per la central hidroelèctrica d'Engolasters i el Centre de Tractament de Residus. En definitiva, l'alta dependència de les importacions, tant elèctriques com d'hidrocarburs, ha estat una constant durant els últims anys, apreciand-se únicament petites fluctuacions provocades per la variabilitat de la generació d'energia hidroelèctrica (veure Fig. 20).

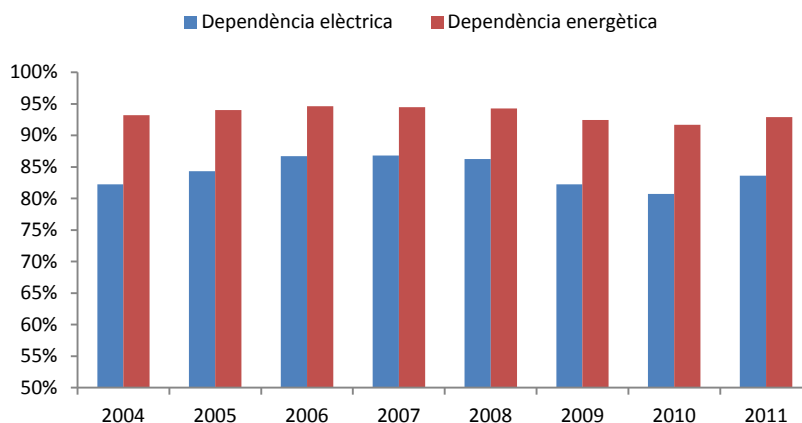


Fig. 20. Dependència energètica total i de les importacions d'electricitat pel període 2004-2011

Pel que fa a la intensitat energètica, mesura que representa la quantitat d'energia primària que utilitza el país per generar una unitat de PIB, la dinàmica decreixent dels primers anys de segle va quedar interrompuda el 2007 i ha seguit una tònica de creixement continuat fins l'actualitat. Tot i que Andorra ha disminuït el consum d'energia primària des de l'inici de la crisi econòmica, aquesta reducció no ha estat proporcional a la del PIB, provocant un canvi de tendència en la intensitat energètica del país (veure Fig. 21).

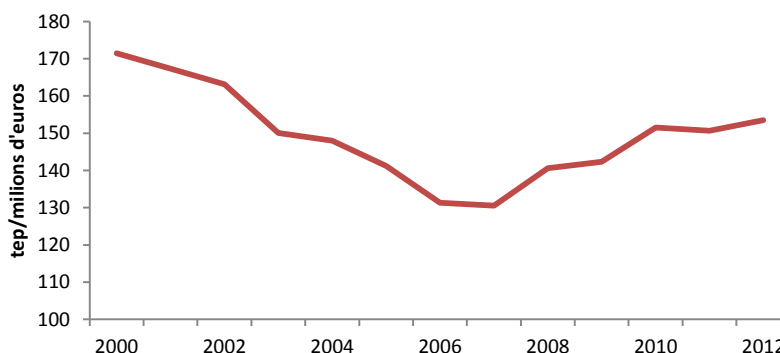


Fig. 21. Intensitat energètica d'Andorra pel període 2000-2012

Tal com s'exposa en la secció 4.1, per tal d'avaluar la seguretat energètica d'Andorra, s'utilitzaran indicadors, representant de forma quantitativa les vulnerabilitats del sistema energètic. Existeixen multitud d'indicadors per representar la seguretat energètica d'un país o regió, tot i que només alguns d'ells són aplicables a escenaris de futur. Per aquest motiu, s'han seguit els següents criteris en la selecció dels indicadors (Jewell et al. 2014):

- (1) Han de ser rellevants per abordar problemàtiques actuals i futures.
- (2) Cal que siguin suficientment genèrics per poder ser aplicats en sistemes energètics radicalment diferents de l'actual.
- (3) Calculables amb les dades disponibles i les derivades dels escenaris futurs.
- (4) Han d'aportar informació addicional a la que aporten 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 es mostra la selecció inicial d'indicadors basats en (Jewell et al. 2012; Jewell et al. 2014), que a posteriori seran inclosos en el model integrat d'avaluació de la seguretat energètica. A mesura que s'avanci en el procés, aquest recull d'indicadors es complementarà en funció de les vulnerabilitats identificades.

Indicador	Relació amb la seguretat energètica	Unitat	Definició	Sector/s d'aplicació	
S o b i r a n i a	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 consumida	Total d'energia, 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 importada, electricitat, algun combustible particularment vulnerable
	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	%	Part del consum d'energia dels diferents sectors cobert amb importacions	Residencial, transport, secundari, terciari, administració pública
R e s i j i c a	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 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
	Diversitat de fonts primàries 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
	Diversitat de fonts secundàries 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
R o b u s t e s a	Edat mitja de les infraestructures	Fiabilitat de les principals infraestructures de transformació i distribució d'energia	Anys en relació a la vida útil planificada	Mitjana d'edat de totes les infraestructures	Distribució i generació d'electricitat
	Capacitat disponible en generació elèctrica	Fiabilitat en la generació d'electricitat	%	Capacitat instal·lada dividida pel pic de consum	Electricitat
	Creixement del sector energètic	Pressió en el sistema energètic provocada pel ràpid creixement	%/any	Creixement anual en l'ús d'energia	Usos finals, fonts secundàries, sectors consumidors d'energia final

Taula 4. Indicadors en seguretat energètica d'aplicació al model integrat d'avaluació de la seguretat energètica d'Andorra

Tal i com es pot apreciar en la Taula 4, en aquest recull inicial hi ha una absència significativa d'indicadors de caire ambiental. Per aquest motiu, els exposats es complementaran amb indicadors principalment centrats en la quantificació d'emissions contaminants, l'ús del sòl i la presència d'energies renovables en el mix energètic del país. Per aquesta tasca es tindrà en

compte el compendi d'indicadors presentat per Sovacool & Mukherjee (2011), seguint sempre els criteris de selecció definits prèviament en la metodologia.

5.1.2 Sector del transport

El transport és el principal consumidor d'energia d'Andorra (39% d'energia primària el 2011) i el major contribuent a les emissions de CO₂ del país (Govern d'Andorra 2012). És també, el principal responsable de la important dependència energètica del Principat, degut a la seva supeditació als combustibles fòssils. Una de les conclusions de la tesina final de màster (Travesset-Baro 2012) és la previsió d'un augment considerable en el consum elèctric a mig termini, provocat en gran part per la progressiva entrada de vehicles elèctrics dins el parc automobilístic andorrà. Aquest fet podria posar en risc la capacitat de subministrament elèctric del país degut a la limitació actual de les infraestructures d'importació d'electricitat (actualment les línies es troben aproximadament a un 85% de saturació). Per aquests motius, durant els dos primers anys de la tesi, s'ha dedicat una atenció especial a aquest sector. S'han abordat dues temàtiques principals, el consum energètic de diferents tecnologies de vehicles en territoris de muntanya i la modelització del parc automobilístic. Aquests estudis permetran aportar dades per augmentar el potencial d'anàlisi i cerca d'estratègies en un sector amb un pes molt important dins el sistema energètic i poc estudiat fins l'actualitat.

Anàlisi del consum energètic del transport en territoris de muntanya

Es conegut que el pendent de les carreteres, així com la massa del vehicle, tenen un impacte significatiu en el consum de combustibles i en el rati d'emissions del sector del transport (Park & Rakha 2006; Frey et al. 2008; Tsang et al. 2011; Boriboonsomsin & Barth 2009). No obstant, existeix una absència d'estudis sobre la influència de l'orografia en el consum energètic dels vehicles elèctrics. Un tret diferencial del VE (vehicle elèctric) respecte el MACI (motor alternatiu de combustió interna) és l'increment de massa degut principalment a la incorporació de les bateries, fet que obliga al vehicle a realitzar un esforç major per desplaçar-se, veient-se traduït en un increment del consum d'energia. Aquest factor assoleix més protagonisme quan el pendent de les carreteres és accentuat. Per contra, el potencial d'emmagatzemar energia del frenat regeneratiu també augmenta amb la massa i el pendent, fent que sigui molt interessant l'anàlisi de quin dels dos factors és més determinant en el comportament energètic final del vehicle.

Un bon nombre d'articles científics assenyalen que el cicle de conducció NEDC (New European Driving Cycle), cicle legislatiu europeu utilitzat per certificar el consum i emissions dels automòbils de la UE, pot subestimar severament les pèrdues d'energia d'un vehicle en una ruta real (Smith 2010). Això és degut a que aquest no té en compte aspectes importants com l'orografia o el disseny de la via (Burgess & Choi 2003). En aquest sentit, és de vital importància el desenvolupament de cicles de conducció representatius de cada territori per a la realització d'avaluacions locals més acurades de consum i emissions dels automòbils (Tzirakis et al. 2006).

L'anàlisi desenvolupat parteix del convenciment de la necessitat d'entendre la dinàmica dels vehicles en zones de muntanya com Andorra, i poder així caracteritzar-ne els consums. L'estudi representa les condicions reals de funcionament d'un VE i d'un MACI en el territori andorrà, tenint en compte aspectes fonamentals com l'orografia, els elements viaris, la congestió de la via i l'estil de conducció. Aquest, és un primer pas necessari en l'avaluació de l'impacte d'un hipotètic canvi massiu en el model de transport, del fòssil a l'elèctric.

L'estudi ha estat desenvolupat en tres parts. S'inicia amb la realització d'un model que descriu el comportament energètic d'un VE i un MACI, segueix amb la caracterització d'una ruta

representativa d'Andorra i finalitza amb una simulació dinàmica que mostra el comportament dels vehicles modelitzats sota diferents escenaris. A continuació, es presenten de forma molt resumida els principals resultats i conclusions que s'han obtingut. Per a més detall del procés, veure l'Annex I, on s'inclou l'article complet resultant d'aquest estudi en revisió a "Transportation Research Part D: Transport and Environment".

Simulació dinàmica

Per tal de realitzar la simulació del comportament energètic dels vehicles en territori andorrà s'ha desenvolupat una aplicació mitjançant Excel i VBA (Visual Basic for Applications), la qual analitza el seu consum energètic circulant per la ruta d'anada i tornada Andorra la Vella-Canillo. El trajecte pot ser realitzat pel vehicle sota diferents escenaris, en funció de la congestió i l'estil de conducció. Per tal de disposar d'un marc de referència amb el qual estudiar en detall l'efecte de l'orografia, s'ha desenvolupat un escenari ideal en el qual aquesta es considerada plana.

Degut a la multitud de paràmetres que entren en joc, són múltiples els possibles escenaris resultants. Per aquest estudi concret se n'han considerat cinc, representant situacions diverses en les quals es podrien trobar els vehicles i que es venen a sumar a l'escenari ideal. La Taula 5 resumeix les característiques dels escenaris considerats.

Escenari	Orografia	Límit de velocitat	Controls de trànsit	Alta congestió	Estil de conducció
Model 0					Velocitat constant
Model 1	X				Velocitat constant
Model 2.1	X	X	X		Normal
Model 2.2	X	Meitat del màxim	X	X	Normal
Model 3	X	X	X		Calmat
Model 4	X	X	X		Agressiu

Taula 5. Resum dels escenaris considerats

Per fins comparatius, a més dels escenaris propis construïts, Artemis Urban i NEDC, han estat simulats com a cicles de conducció representatius de l'àmbit europeu.

Resultats i conclusions

El gràfic de la Fig. 22 mostra els resultats obtinguts, expressats en consum d'energia TTW ("tank-to-wheels") i ràtio TTW, representant la millora d'eficiència TTW que aporta el vehicle elèctric respecte el tèrmic en els diferents escenaris.

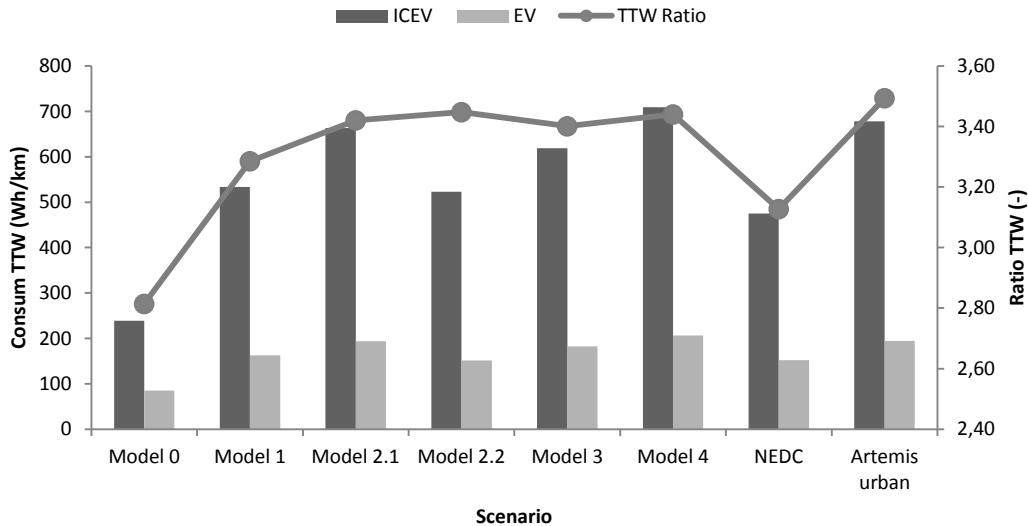


Fig. 22. Consum energètic TTW i ratio TTW segons els diferents escenaris i cicles de conducció considerats. ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle), EV (Electric Vehicle)

Els resultats obtinguts en aquest estudi mostren que el pendent de les carreteres té una influència significativa en el consum d'energia dels vehicles, encara que, afectant en diferent grau en funció de la tecnologia analitzada. Tot i que els VE són més pesats que els MACI, es veuen menys afectats pel pendent degut a la capacitat de recuperar energia durant les baixades i frenades. Els estalvis observats en el consum d'energia TTW són superiors a tres en tots els escenaris, assolint un pic de 3,45 en l'escenari d'alta congestió. Dels resultats d'aquest estudi, se'n desprèn que el cicle legislatiu europeu NEDC, utilitzat per la certificació dels consums i emissions dels vehicles de la UE, subestima significativament els consums respecte una ruta de muntanya com la caracteritzada. Com a conseqüència, l'autonomia dels vehicles elèctrics es veurà afectada, podent suposar una limitació afegida per la implantació d'aquesta tecnologia en zones amb forts pendents.

Aquest estudi, soluciona la incògnita existent entre la diferència de consums estimats pels fabricants i els donats en condicions reals de circulació a Andorra. Conèixer aquest salt entre consums en les diferents tecnologies existents i futures, és un primer pas per tal de poder caracteritzar en detall el sector del transport a partir d'una metodologia "bottom-up".

Model d'estoc del parc automobilístic

Partint de les dades d'altres i inspeccions tècniques de vehicles realitzades des de l'any 1951 (Departament d'Indústria 2014), s'ha iniciat la construcció d'un model d'estoc del parc automobilístic d'Andorra. En una primera fase es treballa únicament amb els turismes, ja que representen gairebé el 70% dels vehicles donats d'alta en l'actualitat.

La metodologia seguida en la implementació del model és la descrita per H. Daly & Ó Gallachóir (2011) adaptant-la a les especificitats del sector del transport d'Andorra. El model utilitza com a variables explicatives l'estructura del parc automobilístic, el perfil d'activitat i l'eficiència energètica. Tal com es mostra en la Fig. 23, els turismes donats d'alta actualment (52082 unitats) han estat agrupats segons l'any de fabricació, el combustible utilitzat (gasoil, gasolina) i la cilindrada (<1400cc, 1400cc-2000cc, >2000cc), ja que aquestes, són variables determinants en el perfil d'activitat dels vehicles (km's/any), en l'eficiència energètica i

conseqüentment, en les emissions contaminants. Els turismes fabricats anteriors a 1984 han estat exclosos del model ja que en aquest grup s'hi troben molts vehicles de museu i també s'hi acumulen errors referents a turismes que no han estat donats de baixa però que de fet ja no estan en actiu. De totes maneres aquests, representen únicament un 4% dels turismes de la base de dades. Per a la descripció del parc actual, s'han tingut en compte els vehicles de gasoil i gasolina, ja que únicament existeix un vehicle elèctric donat d'alta a data actual. Val a dir però, que quan es facin projeccions del parc es tindran en compte altres tecnologies de vehicles.

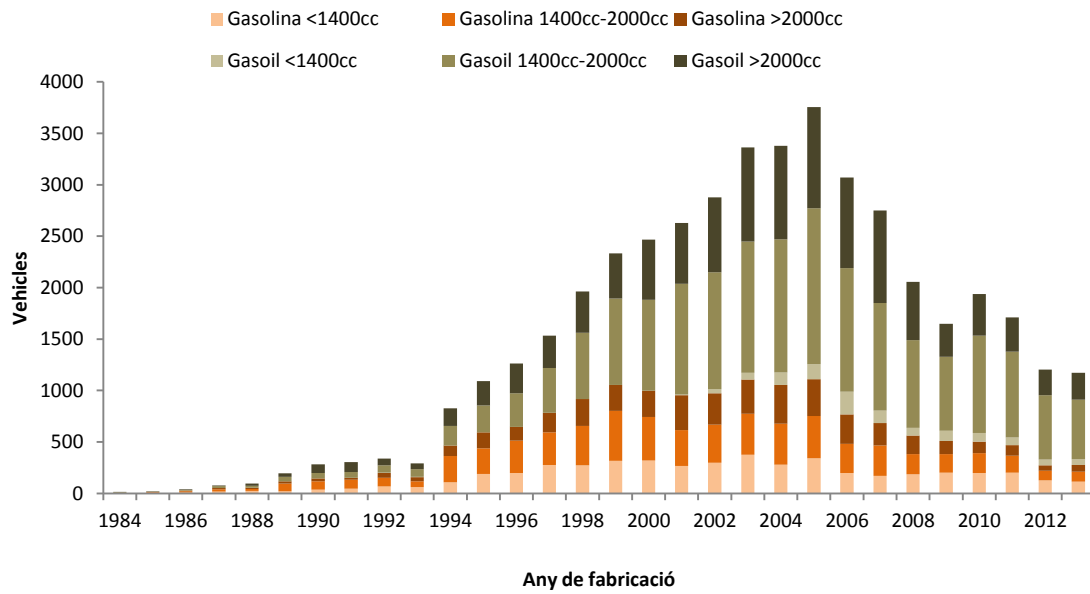


Fig. 23. Estoc del parc automobilístic d'Andorra l'any 2013, segons edat, cilindrada i combustible utilitzat

L'estructura actual del parc automobilístic reflecteix les tendències de vendes de vehicles dels diferents anys. Com es pot observar en la Fig. 23, els turismes de l'any 2005, així com els propers a aquesta data, són els que tenen major pes en el parc actual. Aquest fet, reflecteix clarament els anys de major bonança econòmica, en que les vendes de vehicles eren molt elevades i la posterior crisi econòmica que ha tingut una afectació molt important en el sector de l'automoció. És destacable també, l'increment continuat de pes dels vehicles de gasoil en detriment de la gasolina, representant actualment ja el 65% dels turismes del país (veure Fig. 24).

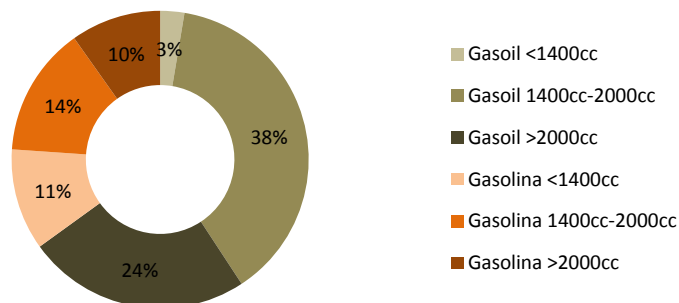


Fig. 24. Distribució de vehicles del parc automobilístic actual en funció de la cilindrada i el combustible utilitzat

Treballar amb una modelització "bottom-up", segregant els vehicles segons tipus de tecnologia i edat, permet obtenir un perfil detallat de l'activitat dels vehicles i del seu consum energètic,

fent possible realitzar una caracterització detallada del consum energètic del parc automobilístic, detectar els factors principals que guien aquest consum i influir en ells a través d'estratègies polítiques.

La Fig. 25 mostra el procés de la implementació del model d'estoc de turismes, que culmina amb l'obtenció del consum energètic del parc actual.

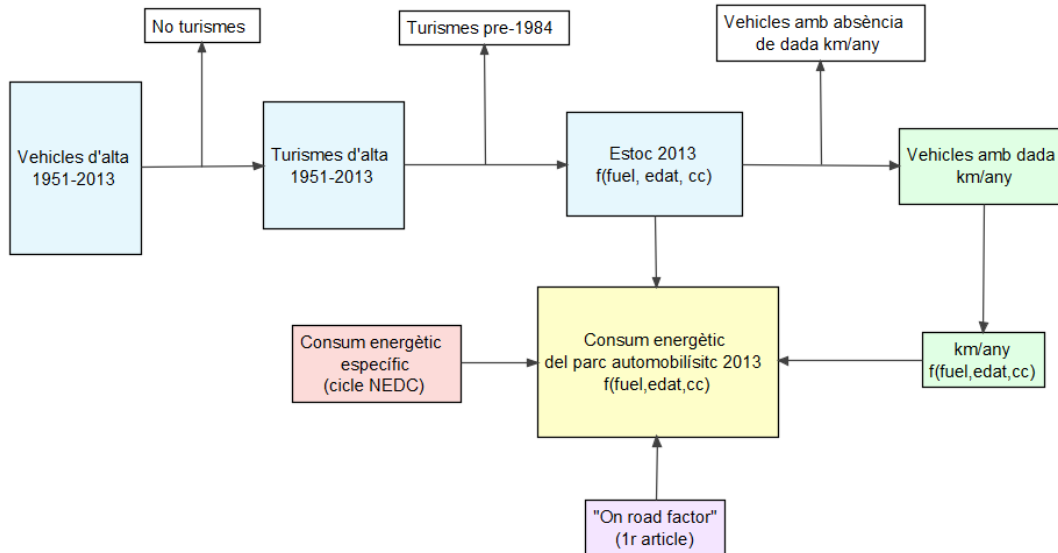


Fig. 25. Procés del desenvolupament del model d'estoc de turismes del parc automobilístic

De l'estoc de 2013, mitjançant les dades de quilometratge registrades en la inspecció tècnica de vehicles, s'obté el perfil d'activitat (km/any) de les diferents tipologies de turismes prèviament definides. Com es pot observar en la Fig. 26, a mesura que els turismes envelleixen, realitzen menys quilòmetres anuals de mitjana. Val a dir que la Fig. 26 mostra la tendència pels anys en que es disposa d'un nombre de mostres representatives, perfectament ajustable mitjançant una funció exponencial negativa que permet extrapolar la corba a la resta d'anys del model. En quan l'activitat dels turismes també s'aprecien diferències significatives en funció del combustible i cilindrada, pel que es treballa amb una corba de perfil d'activitat per a cada una de les tipologies.

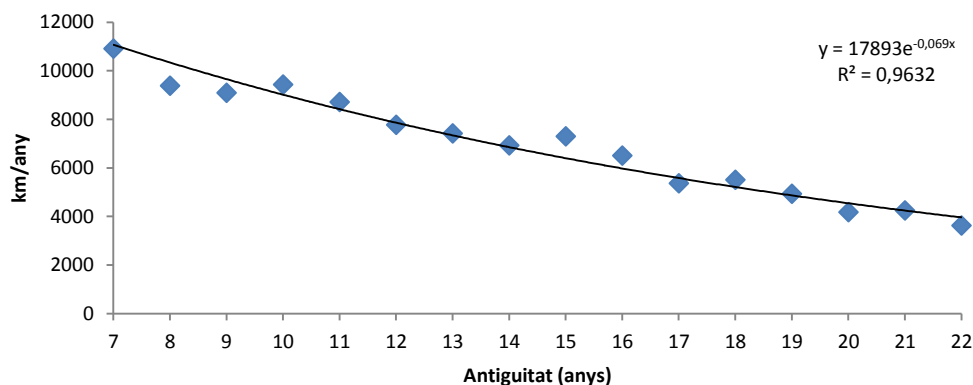


Fig. 26. Perfil d'activitat (km/any) en funció de l'antiguitat del vehicle

D'altra banda, és necessari disposar del consum energètic específic dels diferents models de turismes que conformen el parc actual, dada no disponible en la base de dades obtinguda del Departament d'Indústria. Per superar aquesta limitació, s'està treballant amb la base de dades pública de l'Agència de Certificació de Vehicles de Gran Bretanya (VCA 2014), enllaçant els models de turismes del parc andorrà amb el consum energètic proporcionat per aquesta font. El consum energètic específic és calculat segons el cicle europeu de certificació NEDC, pel que és necessari aplicar la correcció per tal de representar les condicions reals de circulació a Andorra. El primer article derivat d'aquesta tesi, en revisió a *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (veure Annex I), aporta aquest factor corrector conegut en la literatura com a "on road factor".

5.2 Pla de treball

A continuació es mostra el pla de treball detallat per la resta del curs actual i per al curs 2014-2015 i es presenta el diagrama de Gantt corresponent en la Fig. 27.

5.2.1 Juny – Agost 2014

- Projeccions del model d'estoc del parc automobilístic
- Modelització del consum energètic en LEAP

5.2.2 5è Semestre – Setembre 2014 a Febrer 2015

- Integració del model d'estoc del parc automobilístic a LEAP
- Avaluació de polítiques en el sector del transport
- Avaluació de l'impacte d'un canvi massiu en el model de transport, del fòssil a l'elèctric
- 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
- Modelització de l'abastiment d'energia

5.2.3 6è Semestre – Març 2015 a Agost 2015

- Obtenció de l'escenari d'abastiment d'energia elèctrica a llarg termini de mínim cost mitjançant tècniques d'optimització
- Construcció d'escenaris exploratoris i normatius representant els costos econòmics i les externalitats
- Integració dels indicadors de seguretat energètica en el model LEAP
- Avaluació de la seguretat energètica dels escenaris a llarg termini desenvolupats
- Redacció i defensa de tesi

5. Planificació, desenvolupament de la tesi i resultats obtinguts

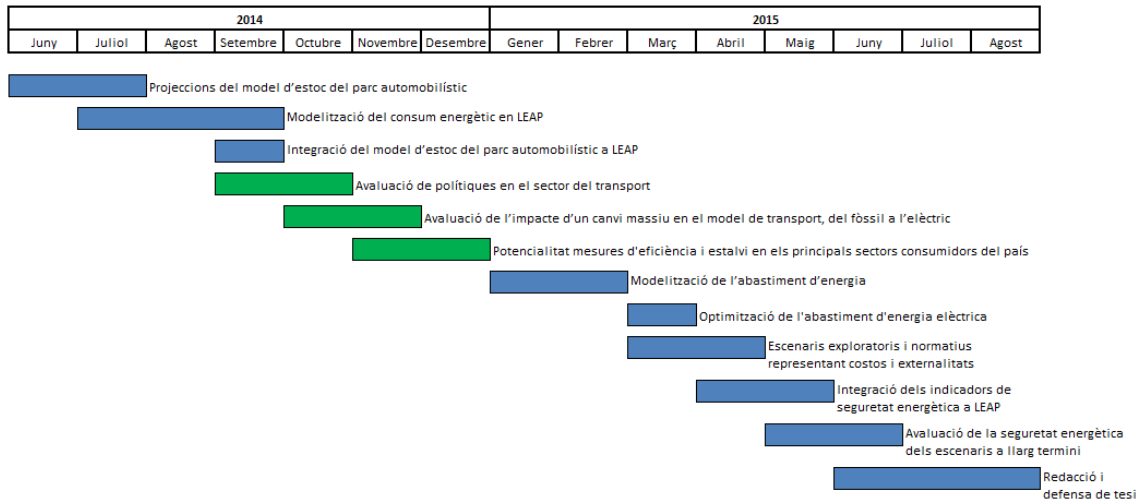


Fig. 27. Diagrama de Gantt de la planificació de la tesi. En verd, planificació d'estada de recerca a l'*Energy Policy & Modelling Group de l'Environmental Research Institute (University College Cork, Ireland)*

6 Bibliografia

- Bardi, U., 2013. The Grand Challenge of the Energy Transition. *Frontiers in Energy Research*, pp.1–10.
- Berger, G., 1964. *Phénoménologie du temps et prospective*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Boriboonsomsin, K. & Barth, M., 2009. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2139, pp.21–30.
- Brons, M. et al., 2008. A meta-analysis of the price elasticity of gasoline demand. A SUR approach. *Energy Economics*, 30(5), pp.2105–2122. Brundtland, G.H., 1987. Our common future. *Oxford paperbacks*, (A/42/427).
- Burgess, S.C. & Choi, J.M.J., 2003. A parametric study of the energy demands of car transportation: a case study of two competing commuter routes in the UK. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 8(1), pp.21–36.
- Cai, W. et al., 2007. Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China's electricity sector. *Energy Policy*, 35(12), pp.6445–6456.
- Cherp, A. & Jewell, J., 2011. The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(4), pp.202–212.
- Comissió Europea, 2000. *Green paper - Towards a European strategy for the security of energy supply*, Brussels.
- Connolly, D. et al., 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), pp.1059–1082.
- Connolly, D. et al., 2011. The first step towards a 100% renewable energy-system for Ireland. *Applied Energy*, 88(2), pp.502–507.
- Costanza, R. et al., 2007. Integrated global models. *Sustainability or collapse? An integrated history and future of people on earth*, 96, pp.417–446.
- Cunningham, R., 2003. La energía, historia de sus fuentes y transformación. *Petrotecnia*, p.7.
- Daly, H. & Ó Gallachóir, B.P., 2011. Modelling private car energy demand using a technological car stock model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(2), pp.93–101.
- Daly, H.E. & Ó Gallachóir, B.P., 2011. Modelling future private car energy demand in Ireland. *Energy Policy*, 39(12), pp.7815–7824.
- Dementjeva, N. & Siirde, A., 2010. Analysis of current Estonian energy situation and adaptability of LEAP model for Estonian energy sector. *Energetika*, (1), pp.75–84.

- Departament d'Estadística, 2014. Govern d'Andorra. Available at: <http://www.estadistica.ad> [Accessed March 28, 2014].
- Departament d'Indústria, 2014. Ministeri d'Economia i Territori, Govern d'Andorra.
- Dias, M.V.X. et al., 2014. The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System. *Energy Policy*, 65, pp.298–304.
- Easterling, W.E., 1997. Why regional studies are needed in the development of full-scale integrated assessment modelling of global change processes. *Global Environmental Change Part A*, 7(4), pp.337–356.
- Flechtheim, O.K., 1966. *History and futurology*, Hain.
- Foxon, T.J. et al., 2013. An analysis of long-term scenarios for the transition to renewable energy in the Korean electricity sector. *Energy Policy*, 52, pp.288–296.
- Frey, H.C., Zhang, K. & Rouphail, N.M., 2008. Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements. *Environmental science & technology*, 42(7), pp.2483–9.
- 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 Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(2), pp.158–177.
- Godet, M. & Roubelat, F., 1996. Creating the future: the use and misuse of scenarios. *Long range planning*, 29(2), pp.164–171.
- Govern d'Andorra, 2012. *Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra*, Andorra la Vella.
- Govern d'Andorra, 2007a. *Pla Estratègic de l'Energia d'Andorra 2006-2015*, Andorra la Vella.
- Govern d'Andorra, 2007b. *Programa Andorra 2020*, Andorra la Vella.
- Guo, B., Wang, Y. & Zhang, A., 2003. *China's energy future: LEAP tool application in China*, Vancouver, Canada.
- Heaps, C., 2011. *Quik Start Guide for Using Optimization in LEAP*.
- Van der Heijden, K., 2005. *Scenarios: the art of strategic conversation*, Wiley.
- 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(11), pp.6790–6803.
- IDAE, 2011. *Análisis del consumo energético del sector residencial en España*.
- IEA, 2007. *Energy use in the new millenium*, Paris.

- IEA, 2012. *World Energy Outlook 2012*, Paris.
- IIASA, 2012. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE).
- IPCC, 2007. *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Janer, A., 2011. L'Oracle de Delfos. Viatge al gran santuari de l'endevinació grega. *Revista Sàpiens*.
- Jewell, J., 2011. *The IEA Model of Short-term Energy Security (MOSES)*, Paris.
- Jewell, J., Cherp, A. & Riahi, K., 2012. *Energy security indicators for use in Integrated Assessment Models*,
- 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, pp.743–760.
- JGCRI/PNNL, 2012. Global Change Assessment Model.
- 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(12), pp.6195–6211.
- Kavgic, M. et al., 2010. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), pp.1683–1697.
- Knight, O., 2012. *Planning for a Low Carbon Future*, Washington, USA.
- Loulou, R. et al., 2005. *Documentation for the TIMES Model Part I*, Paris.
- Loulou, R., Goldstein, G. & Noble, K., 2004. *Documentation for the MARKAL Family of Models*, 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(5), pp.524–531.
- MacKay, D.J.C. & Hafemeister, D., 2010. Sustainable Energy—without the hot air. *American Journal of Physics*, 78, p.222.
- Malaska, P., 2000. Knowledge and information in futurology. *Foresight*, 2(2), pp.237–244.

- Mathiesen, B.V., Lund, H. & Nørgaard, P., 2008. Integrated transport and renewable energy systems. *Utilities Policy*, 16(2), pp.107–116.
- Meadows, D.H. et al., 1972. *The Limits to Growth*, Universe Books, New York.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L. & Randers, J., 1992. *Más allá de los límites del crecimiento*, Aguilar.
- Ministerio de Fomento, 2013. *Código Técnico de la Edificación*.
- Nakata, T., 2004. Energy-economic models and the environment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(4), pp.417–475.
- Nilsson, M. et al., 2012. *Energy for a Shared Development Agenda: Global Scenarios and Governance Implications*, Stockholm, Sweden.
- NOAA, 2013. Carbon Dioxide at NOAA's Mauna Loa Observatory reaches new milestone: Tops 400 ppm. , Available at: <http://www.noaa.gov/> [Accessed October 28, 2013].
- Özer, B., Görgün, E. & İncecik, S., 2013. The scenario analysis on CO2 emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006–2030. *Energy*, 49, pp.395–403.
- Park, S. & Rakha, H.A., 2006. Energy and environmental impacts of roadway grades. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1987).
- Ramos-Martín, J., Giampietro, M. & Ulgiati, S., 2011. Can we break the addiction to fossil energy? *Ecological Modelling*, 223(1), pp.1–3.
- Rogan, F. et al., 2013. LEAPs and Bounds—an Energy Demand and Constraint Optimised Model of the Irish Energy System. *Energy Efficiency*, 7(3), pp.441–466.
- Roinioti, A., Koroneos, C. & Wangenstein, I., 2012. Modeling the Greek energy system: Scenarios of clean energy use and their implications. *Energy Policy*, 50, pp.711–722.
- Rosas-Casals, M., Marzo, M. & Salas-Prat, P., 2014. Sovereignty, Robustness, and Short-Term Energy Security Levels. The Catalonia Case Study. *Frontiers in Energy Research*, 2(May), pp.1–10.
- Rotmans, J. & Asselt, M., 2003. Integrated assessment modelling. *Climate change: An integrated perspective*, pp.239–275.
- Sardar, Z., 2010. The Namesake: Futures; futures studies; futurology; futuristic; foresight-- What's in a name? *Futures*, 42(3), pp.177–184.
- Schwartz, P., 1991. *The art of the long view*, Doubleday/Currency.
- SEI, 2011. *Long-range Energy Alternatives Planning System User Guide for Version 2011*, Somerville, USA.
- Simoës, S. et al., 2013. *The JRC-EU-TIMES model. Assessing the long-term role of the SET Plan Energy technologies*, Luxembourg.

- Smith, W.J., 2010. Plug-in hybrid electric vehicles—A low-carbon solution for Ireland? *Energy Policy*, 38(3), pp.1485–1499.
- Sovacool, B.K. & Mukherjee, I., 2011. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*, 36(8), pp.5343–5355.
- Stahel, A. et al., 2009. Desarrollo sostenible: ¿Sabemos de qué estamos hablando?-Principios básicos para hablar un mismo lenguaje-. *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*. Barcelona, pp. 1–16.
- Takase, K. & Suzuki, T., 2011. The Japanese energy sector: Current situation, and future paths. *Energy Policy*, 39(11), pp.6731–6744.
- Travesset-Baro, O., 2012. Modelització del consum energètic a Andorra. Apunts per a la definició d'un Model Integrat a escala regional.
- Tsang, K.S., Hung, W.T. & Cheung, C.S., 2011. *Emissions and fuel consumption of a Euro 4 car operating along different routes in Hong Kong*.
- Tzirakis, E. et al., 2006. Vehicle emissions and driving cycles: comparison of the Athens driving cycle (ADC) with ECE-15 and European driving cycle (EDC). *Global NEST Journal*, 8(3), pp.282–290.
- Varum, C.A. & Melo, C., 2010. Directions in scenario planning literature-A review of the past decades. *Futures*, 42(4), pp.355–369.
- VCA, 2014. Car fuel data, CO2 and vehicle tax tools. Available at: <http://carfueldata.direct.gov.uk/> [Accessed June 10, 2014].
- De Vries, B.J.M., 2007. Guidance for an Uncertain and Complex World? *Sustainability or collapse?: an integrated history and future of people on earth*, p.379.
- 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, pp.36–48.
- Zemen, M., 1971. Futurology--illusion or reality? *Futures*, 3(1), pp.6–10.

7 Publicacions i altres índex de qualitat

Publicacions

Travesset-Baro, O., (pròximament). La Vanguardia Dossier. Recull de webs especialitzades en energia.

Travesset-Baro, O., Rosas-Casals, M., Jover, E., 2014. Transport energy consumption in mountainous landscapes. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. (*Submitted to Transportation Research Part D: Transport and Environment*)

Cubells, A., Velo, E., Ferrer-Martí, L., Carrillo, M., 2014. Proyectos de electrificación rural con energías renovables. Experiencias, lecciones aprendidas y retos de futuro. Icaria. Tecnología y desarrollo humano. *Support a la redacció i revisió*

Govern d'Andorra, 2012. Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra. *Col·laboració mitjançant els resultats derivats de la Tesina Final de Màster.*

http://www.energia.ad/images/stories/portada/LlibreBlanc_2012.pdf

Xerrades impartides

Taller d'assessorament energètic a Hospitalet Acull. Hospitalet de Llobregat. Emmarcat dins el projecte *Fuel Poverty Group*. 29/04/2014

<http://cultivarenergia.org/>

Taller d'assessorament energètic a l'Associació de Veïns de Ciutat Meridiana. Barcelona. Emmarcat dins el projecte *Fuel Poverty Group*. 06/03/2014

<http://cultivarenergia.org/>

Taller del joc de taula Risk Energètic d'Enginyeria Sense Fronteres. Espai Jove Torre Bassas. 20/02/2014

SUMM Lab Sessions. LEAP – Long range Energy Alternatives Planning System. 29/01/2014

<http://summlab.upc.edu/summlab-sessions>

Jornada Escoles energètiques. Sinèrgies educatives. Presentació del joc de taula Risk Energètic d'Enginyeria Sense Fronteres. Sabadell. 03/07/2013

<http://ca.sabadell.cat/Energia/d/ESCENER3juliol.pdf>

Formació complementària

Ecoserveis i ABD 02/2014

Introducció a la Pobresa Energètica. Emmarcat dins el projecte *Fuel Poverty Group*

<http://cultivarenergia.org/>

The University of Texas System 12/2013

1.01x: Energy 101

A course of study offered by UTAustinX, an online learning initiative of The University Of Texas System through edX.

Berkeley – University of California 06/2013

Stat2.2x: Introduction to Statistics: Probability

A course of study offered by BerkeleyX, an online learning initiative of The University Of California At Berkeley through edX.

Cibernàrium – Ajuntament de Barcelona 05/2013

Eines per a la visualització de dades: converteix informació en coneixement

Cibernàrium – Ajuntament de Barcelona 05/2013

Google Fusion Tables: com visualitzar dades amb component geogràfic

IL3 – Universitat de Barcelona 04/2013

Parlar en públic: Presentacions Eficaces

Berkeley – University of California 04/2013

Stat2.1x: Introduction to Statistics: Descriptive Statistics

A course of study offered by BerkeleyX, an online learning initiative of The University Of California At Berkeley through edX.

Studio Experimental: Energy, Design, Architecture & Programation 04/2013

Curs Design Builder

Simulació energètica d'edificis basada en el motor de càlcul EnergyPlus.

Beques

Gobierno de España. Ministerio de Educación, cultura y deporte. Beca per realitzar un curs d'immersió en llengua anglesa durant el mes de Juliol de 2014 a la Universidad Internacional Menéndez Pelayo.

Govern d'Andorra. Ministeri d'Educació i Joventut. Ajuts a estudiants de tercer cicle que volen prosseguir o iniciar la seva formació en recerca durant el curs 2013-2014. ATC0012-AND-2013/2014

Govern d'Andorra. Ministeri d'Educació i Joventut. Ajuts per al pagament de les matrícules universitàries dels estudis de tercer cicle, any 2013.

Govern d'Andorra. Ministeri d'Educació i Joventut. Ajuts per al pagament de les matrícules universitàries dels estudis de tercer cicle, any 2012.

Altres mèrits

Participació en la Taula de la Pobresa Energètica de Terrassa com a investigador del grup de recerca SUMM Lab.

Annex I

Transport energy consumption in mountainous landscapes. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra

Oriol Travesset-Baro^{a,b,*}, Marti Rosas-Casals^a, Eric Jover^b

^a*Sustainability Measurement and Modeling Lab (SUMMLab), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), EET-Campus Terrassa, 08222 Barcelona, Spain*

^b*Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra (OBSA), Plaça de la Germandat 7, AD600 Sant Julià de Lòria, Andorra*

Abstract

This paper analyses transport energy consumption of conventional and electric vehicles in mountainous landscapes. A standard round trip in Andorra has been modelled in order to characterise vehicle dynamics in hilly regions. Two conventional diesel vehicles and their electric-equivalent models have been simulated and their performances have been compared. Six scenarios have been simulated to study the effects of factors such as orography, traffic congestion and driving style. The European fuel consumption and emissions test and Artemis urban driving cycles, representative of European driving cycles, have also been included in the comparative analysis. The results show that road grade has a major impact on fuel economy, although it affects consumption in different levels depending on the technology analysed. Electric vehicles are less affected by this factor as opposed to conventional vehicles, increasing the potential energy savings in a hypothetical electrification of the car fleet. However, electric vehicle range in mountainous terrains is lower compared to that estimated by manufacturers, a fact that could adversely affect a massive adoption of electric cars in the short term.

Keywords

Energy consumption; road grade; driving cycle; electric vehicle; internal combustion engine; Andorra

1. Introduction

Transport accounts for 19% of global energy use and 23% of energy-related carbon dioxide (CO₂) emissions, and these percentages are set to rise in the future. Given current trends, transport energy use and CO₂ emissions are projected to increase by nearly 50% by 2030 and more than 80% by 2050 (IEA, 2009). Within the European Union framework, CO₂ emissions from road transport increased by nearly 23% between 1990 and 2010. If it were not for the economic downturn, this percentage could have been even higher. In fact, transport is the only major sector in the EU where greenhouse gas emissions are still rising (European Commission, 2013). In recent years, alternative vehicle technologies look to address challenges associated with the current transport model, such as high dependence on oil, its contribution to global warming and the consequences of energy security issues, to name but a few. The future benefits of new vehicle technologies have been studied by many authors, both in terms of energy and CO₂ savings (JRC et al., 2013; Lorf et al., 2013; Mari Svensson et al., 2007), but also from an economic, financial and European market perspective (Thiel et al., 2010). Nonetheless, most of these studies are based on standard driving cycles and are not necessarily representative of regional or local driving conditions.

Road grades and vehicle mass are known to have a significant impact on fuel consumption and emission levels (Boriboonsomsin and Barth, 2009; Frey et al., 2008; Park and Rakha, 2006). Few studies, however, have specifically investigated the influence of hilly roads on energy demand in electric vehicles. The New European Driving Cycle (NEDC), the legislative cycle in the EU countries for certifying vehicle fuel consumption and emission levels, tends to

* Corresponding author. Tel.: +34646653869 (O. Travesset-Baro)

E-mail address: travesset@gmail.com

Plaça de la Germandat 7, AD600, Sant Julià de Lòria, Andorra

underestimate the consumption levels obtained under real-world conditions (Smith, 2010a; Tzirakis et al., 2006). This is due to the low acceleration rates considered and the fact that it doesn't take into account some parameters that affect fuel consumption (Burgess and Choi, 2003). Specificities of the route like orography are not considered in the NEDC, which could have a significant impact in some regions. Road grades and traffic operation of routes in mountainous landscapes imposes the need to develop a representative driving cycle for more accurate evaluation of fuel consumption in this type of landscape.

The aim of this paper is to improve the understanding of vehicle dynamics in hilly regions and to implement methodologies to characterise fuel consumption. It also aims to analyse how specific aspects of electric vehicles, such as increments in mass linked with batteries and regenerative braking, affect the energy demand in mountainous landscapes. Andorra has been chosen as the subject of the case study. Andorra is a small, mountainous country located between France and Spain, with a population around 70,000 inhabitants and 468 km² extension. Its location in the middle of the Pyrenees means it has a hilly terrain with important road slopes. Urban roads are predominant because of the high demographic density. The transport sector is the main energy consumer of the country (39% of primary energy consumed in 2011) and the leading source of greenhouse gas emissions (Andorra Government, 2012). Energy consumption related with transport, particularly road, has increased considerably over the last decades. Motor fuel imports increased from 111 million litres in 1993 to 130 million litres in 2012 (Department of Statistics, 2013).

In this paper, a real route in a mountainous region has been characterised to obtain data on energy consumption in car transportation. The study includes internal combustion engine vehicles (ICEVs) and electric vehicles (EVs) comparing their energy behaviour in mountainous landscapes, in general, and in Andorra, in particular. The paper is organised as follows. Methodology and assumptions are presented in Section 2. Section 3 provides the results and discussion. Finally, conclusions and some prospects for future work are presented in Section 4.

2. Material and methods

A spreadsheet-based model has been developed in order to analyse energy consumption in vehicles along the characterised route in Andorra. This section presents the energy consumption model, outlines the route, and provides the assumptions made during the modelling process.

2.1 Energy consumption model

A simplified model has been used to describe the behaviour of vehicles along the route and estimate their energy consumption. Tractive effort required at the wheels (F_{te}) for propelling the vehicle forward is calculated for every time step (one second for this model). Forces opposing the movement are considered (rolling resistance, aerodynamic drag) as well as hill climbing and inertial forces, which may be negative when the vehicle is going downhill or slowing down respectively. The total tractive effort equation is written as:

$$\begin{aligned} F_{te} &= F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_i = \\ &= \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha + C_i \cdot m \cdot a \end{aligned} \quad (1)$$

Where:

F_{rr} is the rolling resistance force,

F_{ad} is the aerodynamic drag,

F_{hc} is the hill climbing force,

F_i is the inertial force,

μ_r is the rolling resistance coefficient, m mass of the vehicle, g gravitational constant, α angle of road grade, ρ air density, A frontal area of the vehicle, C_d drag resistance coefficient, v vehicle speed, C_i mass correction factor for rotational inertia acceleration, and a vehicle acceleration.

Assuming a tank-to-wheels analysis, the energy consumption is calculated at each section of road when any of the variables involved in the model change. This is mainly caused by road factors such as land profile or traffic control elements. The energy consumption of the route is given by:

$$E_{TTW} = \frac{F_{te} \cdot d_e}{\eta_{TTW}} \quad (2)$$

where d_e is the distance travelled for every constant tractive effort, and η_{TTW} is the vehicle tank-to-wheels efficiency.

The battery integrated in the EV can be recharged during deceleration with regenerative braking. The energy recovered during this process is given by:

$$E_{rec} = F_{te} \cdot d_r \cdot \eta_{TTW} \cdot E_{RB} \quad (3)$$

where d_r is the distance travelled in regeneration mode, and E_{RB} is the wheels-to-battery regenerative efficiency. In this case, energy will be recovered by regenerative braking when $F_{te} < 0$.

Finally, energy consumption for the whole route for both EV and ICEV is calculated by:

$$E_{TTW_{EV}} = \sum_{cycle} \frac{F_{te_{EV}} \cdot d_e}{\eta_{TTW_{EV}}} - \sum_{cycle} E_{rec} \quad (4)$$

$$E_{TTW_{ICEV}} = \sum_{cycle} \frac{F_{te_{ICEV}} \cdot d_e}{\eta_{TTW_{ICEV}}} \quad (5)$$

2.2 Route characterisation

The route used in the model as a representative driving cycle in Andorra is the round trip between Andorra la Vella (the country's capital) and Canillo (a village northeast of the capital) along the main road (CG-2). The route has a distance of 24.6 km, an absolute mean road slope of 4.37%, and a maximum grade of 12.5%. This route starts and finishes at Andorra la Vella and goes through Escaldes-Engordany and Encamp (second and third villages in number of inhabitants, respectively). It is currently the most transited route in the country. Fig. 1 shows the geographical location of Andorra and the characterised route.



Fig. 1. Main route between Andorra la Vella and Canillo. (Source: Google Maps and Geocontext-Profiler)

In order to represent a detailed model of the route, a geographical information system has been used with specific road data. The elevation profile has been obtained using the topographic map of Andorra from 2003 (Andorra Government, 2003). An onsite survey using GPS has been performed to determine the exact location of several traffic elements like traffic lights, roundabouts, pedestrian crossings and speed limits. The results of this compilation are displayed in Fig. 2.

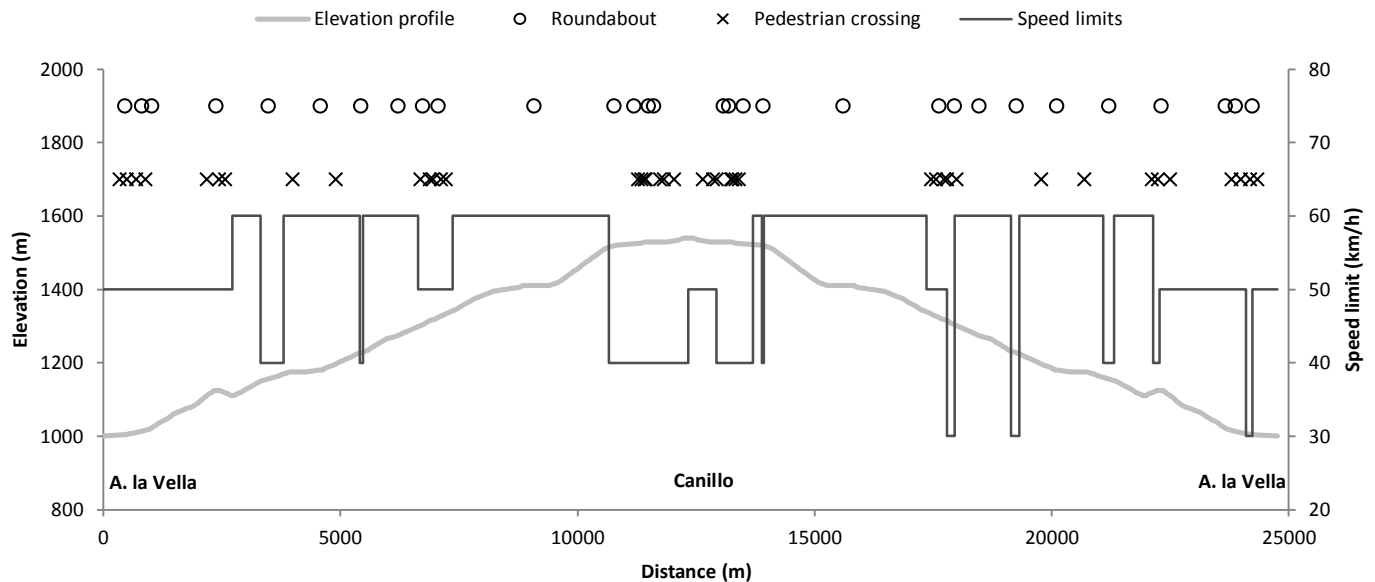


Fig. 2. Geographical data compilation of the round trip between Andorra la Vella and Canillo

As shown in Fig. 2, speed signals are less restrictive in the Andorra la Vella–Canillo stretch than in the return trip, coinciding with most uphill stretches. Speed limits are low, ranging from 30 to 60 km/h. Although the route has some extra-urban driving between Escaldes-Engordany-Encamp and Encamp-Canillo, the speed profile is more similar to an urban driving cycle. Traffic lights are considered as pedestrian crossings because all are controlled by pedestrian-crossing buttons.

2.3 Model assumptions

Two conventional diesel vehicles and their electric-equivalent models have been simulated in order to explore the effects of a hypothetical future electrification of the car fleet. Currently there are only a few vehicle models with both electric and ICE versions, although some of them are already available or will be available shortly. VW Golf has been selected because it represents a common European C-segment 5-seater vehicle and one of the dominant models both in the European market and for Andorra's vehicle fleet. Its electric version is called Golf *Blue-e-motion* (available in the UK from 2014). Toyota RAV4 represents J-segment sport utility cars (SUV), which is very common in mountainous regions and heavier than C-segment vehicles. RAV4 EV is one of the few all-electric off-road vehicles in the market, currently only available in California. For comparative purposes, vehicles with similar engine power have been selected.

Essential differences considered in the simulation between conventional and electric models are: (a) batteries, (b) engine, (c) regenerative braking, and (d) vehicle mass. In general, EVs are heavier than ICEVs due to the electric engine and batteries, although this is partially overcome by the decrease in weight due to the absence of a combustion engine and tank. Increases in vehicle mass have a determining impact on fuel consumption (Burgess and Choi, 2003; Tolouei and Titheridge, 2009), and this factor must be included in the model. According to the vehicle comparison presented in Thiel et al. (2010), EVs can be considered to be, on average, 185 kg heavier than diesel ICEVs. In the study, and following manufacturer's specifications, mass differential between EV and ICEV is 205 kg for Golf and 271 kg for RAV4. Relevant characteristics of the modelled vehicles are summarised in Table 1.

	Golf diesel ¹	Golf Blue-e-motion ²	RAV4 diesel ³	RAV4 EV ⁴
Power (hp)	105	115	150	154
Mass (kg)	1295	1500	1558	1829
Drag coefficient (-)	0.28	0.28	0.3	0.3
Frontal area (m ²)	2.21	2.21	2.6	2.6
Battery capacity (kWh)		26.5		35

Table 1. Manufacturer's specifications of the simulated vehicles

¹ https://app-ssl.volkswagen.es/es/compra_un_vw0/catalogos.htm

² <http://www.volkswagen.co.uk/about-us/futures/golf-blue>

³ <http://www.toyota.com/espanol/rav4>

⁴ <http://www.toyota.com/rav4ev>

Conventional vehicles are modelled considering an average engine and transmission efficiency. According to Bandivadekar et al. (2008), current ICEV transmission efficiency can be considered to be 89%. Engine efficiencies of 28% for VW Golf and 24% for RAV4 have been taken, since they reproduce energy consumption results in the simulations (using the NEDC) consistent with those published by manufacturers.

Due to the absence of detailed information on batteries in the manufacturer’s specifications for EVs, battery modelling has been based on current technology. EVs have been modelled with lithium-ion batteries with an energy density of 125 Wh/kg and a depth of discharge of 80% (Gerssen-gondelach and Faaij, 2012). Battery behaviour during charge and discharge has been considered to be lineal. As shown in Fig. 3, in our vehicle model, there are bidirectional energy flows between the vehicle socket and wheels through the AC/DC converter, battery, DC/AC converter, motor/generator and transmission.

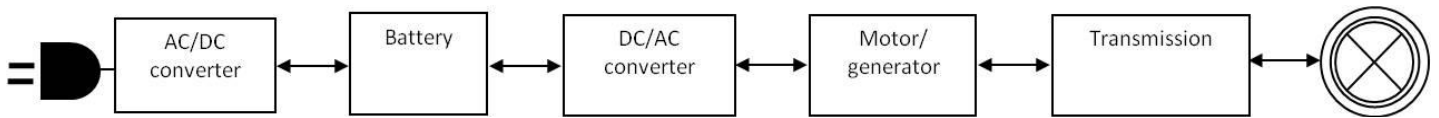


Fig. 3. Energy flow through the EV model

EV socket-to-wheels efficiency is taken as 69%, based on the average values of EV components found in reviewed literature (Smith 2010a; Campanari et al. 2009; Hayes et al. 2011; Van Sterkenburg et al. 2011; van Vliet et al. 2011). A similar procedure has been followed to define the regenerative braking efficiency (E_{RB}). E_{RB} establishes which part of the energy otherwise wasted during deceleration and downhill motion is recovered with regenerative braking. Energy recovered flows through the wheels to the battery. Values range from 59% to 84% (Van Sterkenburg et al. 2011; Smith 2010a; Campanari et al. 2009), resulting in a mean value of 69%. Table 2 summarises these efficiencies for EV components including E_{RB} .

EV components efficiency	(Smith, 2010b)	(Campanari et al., 2009)	(Hayes et al., 2011)	(Van Sterkenburg et al., 2011) ⁵		(van Vliet et al., 2011)	Assumed value	Standard deviation
AC/DC converter	96		90				93	4.2
Battery input	96	96		95	99	90	95	3.3
Battery output	95	96		93	98	96	96	1.8
DC/AC converter	96	97	98				97	1.0
Electric motor	90	92	95	81	89		89	5.2
Electric generator	85	92	95	82	88		88	5.2
Mechanical transmission	98	98	97	89	89		94	4.8
Socket to wheels efficiency							69	
E_{RB}	65	84		69	59		69	

Table 2. Component and regenerative braking efficiency assumed for EV simulation (all values in %)

Rolling resistance (μ_r) has a direct impact on fuel consumption. It depends essentially on tyre characteristics and road factors. The effect on total fuel consumption will vary according to a number of factors, including engine and drive train efficiency, as well as the amount of energy used by accessories. It is shown that a 10% reduction in the rolling-resistance coefficient can reduce total energy consumption by 2% (Burgess and Choi, 2003). For most passenger tyres sold in the United States, the tyre coefficient, measured when new, falls between 0.007 and 0.014 (National Research Council, 2006). According to JRC et al. (2013), and taking into account that the route is a paved road, a reasonable value of 0.007 is taken, both for ICEV and EV.

The model assumes that in real scenarios, the vehicle travels at a speed equal to the road’s speed limits, except in the case of high traffic congestion. The vehicle stops 30 seconds at one out of every four pedestrian crossings. At roundabouts, it decelerates until it stops for 2 seconds and then it starts to accelerate again. The acceleration-deceleration rates are considered to be constant and vary depending on the driving style assumed in the different

⁵ This paper describes the analysis of the efficiency of regenerative braking of two electric vehicles operating in the Rotterdam area.

scenarios. The acceleration-deceleration values are based on De Vlieger et al. (2000), assuming 0.55 m/s² for calm driving, 0.725 m/s² for normal driving, and 0.975 m/s² for aggressive driving. These values are consistent with driving patterns representative of European driving presented in André et al. (2006). According to the authors, calm driving means anticipating other road users' movements, traffic lights, speed limits, and avoiding hard accelerations. Normal driving implies moderate acceleration and braking. By aggressive driving, sudden acceleration and heavy braking is meant.

In the next section, an energy consumption evaluation for EV and ICEV is presented. In order to obtain comparable results, a TTW analysis has been performed, providing relevant information on how efficiently the engine turns fuel into energy to impel the vehicle. Based on general legislative regulations (UNECE, 2013), as shown in Fig. 3, in the EV TTW analysis, energy flows between vehicle socket and the wheels, including charging losses.

3. TTW analysis for ICEV and EV under different scenarios

The energy consumption derived from TTW analysis is expressed in Wh/km. The TTW analysis expresses only final energy; a well-to-wheels (WTW) analysis would be necessary to determine primary energy consumption. The TTW ratio is defined in this paper as:

$$TTW\ ratio = \frac{E_{TTW_{ICEV}}}{E_{TTW_{EV}}} \quad (6)$$

This ratio expresses the improvement in TTW consumption for EV compared to ICEV. The EV range is also estimated for all scenarios in order to compare results for those obtained with the reference driving cycle used by manufacturers.

The characterised route can be travelled by vehicles in multiple scenarios, depending on factors such as traffic congestion and driving style. The main objective here is to quantify variability in consumption, in order to determine which factors affect vehicle performance most significantly. To do so, six scenarios have been assessed to analyse and compare the TTW behaviour of EVs and ICEVs. Model 0 and Model 1 are unreal scenarios where speed is considered constant. These are used as null models for studying the effect of orography and traffic controls in detail. Table 3 gives a summary of the most important aspects of each scenario.

Scenario	Orography	Road speed limit	Traffic controls	High traffic congestion	Driving style
Model 0					Constant speed
Model 1	X				Constant speed
Model 2.1	X	X	X		Normal
Model 2.2	X	Half of maximum	X	X	Normal
Model 3	X	X	X		Calm
Model 4	X	X	X		Aggressive

Table 3. Summary of the scenarios considered

Table 4 shows TTW consumption and ratio for two conventional diesel vehicles and their electric-equivalent models and for all scenarios. The NEDC and Artemis urban (André, 2004) driving cycles have also been included as scenarios in the simulation, in order to be used as a reference for energy consumption. As similar trends have been observed for both vehicles, the results have been expressed as average values between two simulated EVs and ICEVs in Fig. 4. As can be seen, the results obtained for RAV4 (both versions) are higher than those for Golf, due to increased mass and poorer aerodynamic characteristics. In the off-road vehicle case, the TTW ratios are higher in all scenarios. These results are discussed thoroughly in the following subsections.

	Model 0	Model 1	Model 2.1	Model 2.2	Model 3	Model 4	NEDC	Artemis urban
Golf Diesel (Wh/km)	193.89	437.43	544.40	429.43	507.99	582.10	387.09	556.94
Golf Blue-e-motion (Wh/km)	75.91	145.98	174.45	136.51	163.71	185.47	136.02	174.72
Golf TTW ratio (-)	2.55	3.00	3.12	3.15	3.10	3.14	2.85	3.19
RAV4 Diesel (Wh/km)	284.20	630.43	782.64	615.93	730.35	836.85	563.64	799.49
RAV4 EV (Wh/km)	93.98	179.04	213.52	166.69	200.39	227.01	167.97	213.52
RAV4 TTW ratio (-)	3.02	3.52	3.67	3.69	3.64	3.69	3.36	3.74

Time (min)	27.44	27.44	47.13	69.03	50.90	43.95		

Table 4. TTW consumption and TTW ratio of simulated vehicles

3.1 Model 0

Model 0 represents an ideal round trip between Andorra la Vella and Canillo, with a flat profile and no traffic controls. Constant speed (53.95 km/h) is taken as the average of the speed limits along the route. This model represents an unreal null scenario, built for comparative purposes. As shown in Fig. 4, Model 0 scenario has the lowest energy demand. This indicates, as expected, that a flat profile and constant speed minimise energy consumption in both vehicle technologies. In this scenario, the TTW ratio has the lowest value.

3.2 Model 1

As in Model 0, this is a hypothetical trip without any traffic controls and where constant speed is assumed. In this case, the orography factor is included in order to study the consequences of road grade, since it has a significant impact on energy consumption. In this scenario, ICEV energy consumption increases by 123.4% compared to Model 0. However, as shown in Fig. 4, the TTW ratio increases between Model 0 and Model 1, illustrating that the orography factor has a minor negative impact on EVs. Therefore, it is demonstrated that the energy-recovering capacity of regenerative braking outweighs the negative impact imposed by increments in mass in EVs.

3.3 Model 2

Model 2 represents a real scenario with orography and traffic controls. A normal driving style is assumed, considering acceleration-deceleration rates to be constant and equal to 0.725 m/s^2 according to De Vlieger et al. (2000). Two sub-scenarios are considered in this level, depending on traffic congestion: low traffic congestion assumes that vehicles could accelerate until they reach the speed limit for the route, while the high traffic congestion scenario assumes that maximum speed achieved by vehicles will be half of the maximum speed limit.

2.1) In the low traffic congestion scenario, ICEV energy consumption increases by 24.3% compared with Model 1 where traffic controls are not considered. This increase can be explained by the inertial force incorporated in the acceleration-deceleration process. The TTW ratio also increases, showing that EV has better energy performance than ICEV in a context with speed variability. It is also associated with EV's capacity to capture energy during deceleration.

2.2) In the high traffic congestion scenario, the results show that the energy consumption for the trip decreases by 21.2%. Although trip time increases, the energy required per kilometre decreases due to lower vehicle speed. It also confirms that reducing speed limits is one of the most effective ways to decrease energy consumption. The TTW ratio is the highest among all real scenarios analysed, confirming that EV performance is significantly improved above ICEV performance when operating at low speeds and high speed variability.

3.4 Model 3

Model 3 is a real scenario with low traffic congestion and a calm driving style. Acceleration-deceleration rates are assumed to be constant and equal to 0.55 m/s^2 according to De Vlieger et al. (2000). ICEV energy consumption is 6.7% lower than in Model 2.1, where normal driving behaviour is considered, and the TTW ratio decreases moderately until 3.40. The results are consistent with those obtained by Smokers et al. (2006) when analysing eco driving (6-10%). Thus, promoting eco-driving is proven useful in not only reducing energy consumption but also for improving road traffic safety.

3.5 Model 4

Model 4 is a real scenario with low traffic congestion and an aggressive driving style. Acceleration-deceleration rates are assumed to be constant and equal to 0.975 m/s^2 according to De Vlieger et al. (2000). ICEV energy consumption is 6.9% higher than in Model 2.1, where a normal driving behaviour is considered. In the same way, the results show that energy consumption increases 14.6% with an aggressive driving style compared to calm driving behaviour. Literature suggests that aggressive driving results in a sharp increase in fuel consumption compared to normal

driving (12-40% for an aggressive driver depending on road type and vehicle technology) (De Vlieger et al., 2000; Nuzzolo et al., 2013). The low speed profile of our route, and its consequently lower speed variability, could explain the moderate increase in energy consumption obtained in the study. A small rise in the TTW ratio is achieved due to an increase in the deceleration rate, thus improving the EV's capacity to recover energy.

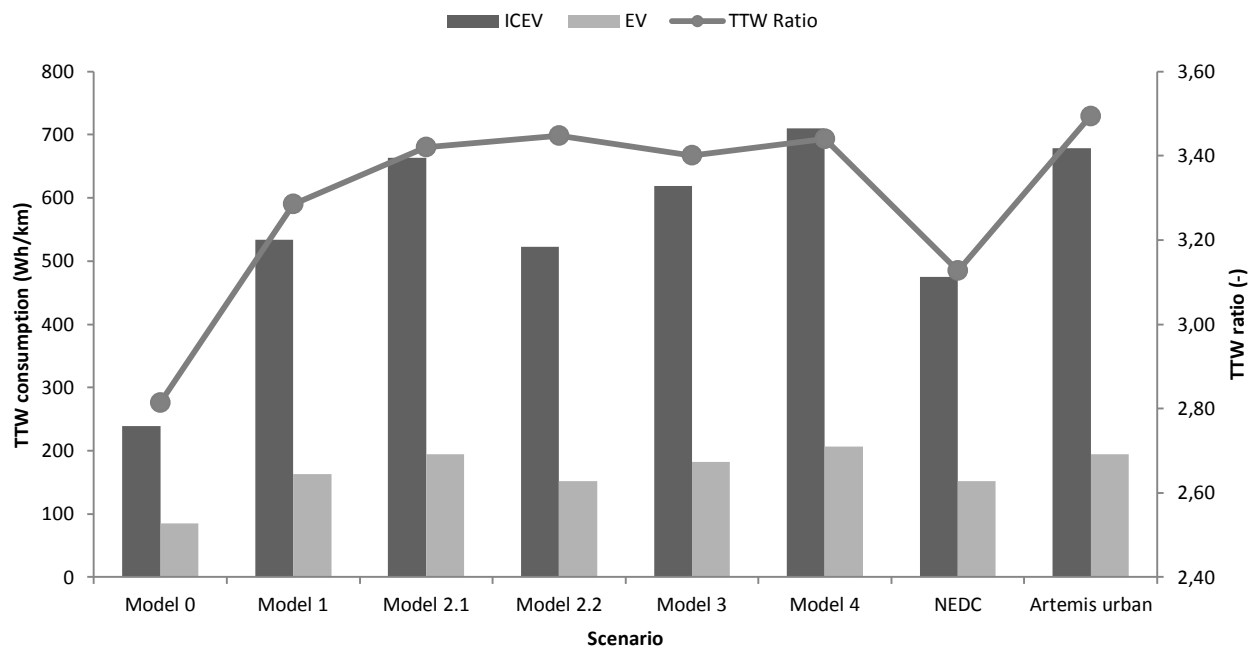


Fig. 4. TTW energy consumption and TTW ratio under different scenarios and driving cycles

3.6 European driving cycles

Some driving cycles used in measuring road fuel consumption have also been included in the comparative analysis. The NEDC has been selected because it is the European legislative driving cycle. It combines urban and extra-urban driving and is used for vehicle fuel economy and emission levels certification in the EU. It is considered by many authors to be a less aggressive cycle and non-representative of real world conditions. Comparing its results with those obtained in the scenarios above, it is shown that the NEDC tends to underestimate fuel consumption. In the case of EVs, the NEDC TTW energy consumption is 21.6% less than in Model 2.1, the scenario where low traffic congestion and normal driving style is considered. For ICEVs, this value rises to 28.4%. The TTW ratio is considerably lower than that obtained in the scenarios analysed, with the exception of the ideal trip, Model 0. This suggests, designed as it is, that the speed profile of the NEDC does not take full benefit of one of EV's salient features that is regenerative braking.

Artemis urban driving cycle has also been included as it represents urban driving conditions at lower speed and with more aggressive driving than in the NEDC. Based on these characteristics, energy behaviour might be expected to be more similar to the modelled road than in the NEDC. The Artemis urban driving cycle was developed within the European research project ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) and is based on the statistical analysis of a large database of European real-world driving patterns (André, 2004). The Artemis urban energy consumption results are very close to those obtained in Model 2.1 for both technologies analysed, 2.2% higher in the case of ICEVs and only 0.1% in EVs. The TTW ratio is slightly higher than those obtained in the different scenarios. This can be explained by the fact that the Artemis urban driving cycle has high speed variability, a factor that benefits EVs when compared to ICEVs.

3.7 Orography, range and regenerative braking

The results of our research support the fact that hilly routes increase vehicle energy consumption in both technologies analysed. Nonetheless, this type of orography affects consumption in differing degrees, depending on the vehicle technology. Although EVs are in general heavier than ICEVs, they fare better with changing road grades as energy is recovered on downhill sections. The same trends are observed for vehicle range, a factor that has a relative importance in ICEVs but that is significant in EVs. The limited range of EVs is considered one of the major

barriers against massive adoption of electric cars (Shafiei et al., 2012; Sovacool and Hirsh, 2009). In our model, EV range is estimated and compared to those values obtained using the NEDC. Range results for EVs under analysis are shown in Table 5. In Model 2.1, the scenario where moderate acceleration and braking is considered, EV range is estimated to be reduced by 21.8% prior to the simulation using the NEDC. In the scenario where aggressive driving style is considered (Model 4), its value rises to 26.9%. This fact could be considered as an extra limitation for EV market penetration in mountainous landscapes. These results may potentially be of interest for the long-term planning of charging stations in Andorra and other mountainous regions.

Scenario	Golf Blue e-motion	RAV4 EV
Model 2.1	122	131
Model 2.2	155	168
Model 3	129	140
Model 4	114	123
NEDC	156	167

Table 5. EV range (km) of simulated vehicles

Other factors that were not considered in this research, such as electrical equipment, vehicle load, outside temperature and exposure to wind, can slightly affect EV range. Therefore in an extreme situation, range could be limited even more. Nevertheless, some studies point out that most daily vehicle mileage is significantly lower than EV ranges obtained in this and other results (Pearre et al., 2011).

As explained in Section 2.1, the characterised route is the round trip starting and ending in Andorra la Vella. The trip from Andorra la Vella to Canillo is generally uphill, with a mean road grade of 4.37%. The return trip is downhill, a profile suited to regenerative braking. By analysing the evolution of energy consumed during the trip, a significant difference between ICEV and EV was detected. As shown in Fig. 5 (Model 2.1), energy consumption increases in ICEVs during the entire route and at a higher rate during uphill sections. In contrast, EV energy consumption stabilises its value on downhill sections. More specifically, at the middle point of the round trip (Canillo – 1540 m), EV accumulated consumption is 4436.9 Wh, 3.1% higher than at the final point (A. la Vella – 1005 m). This is due to more energy being stored in the battery during descent than is consumed.

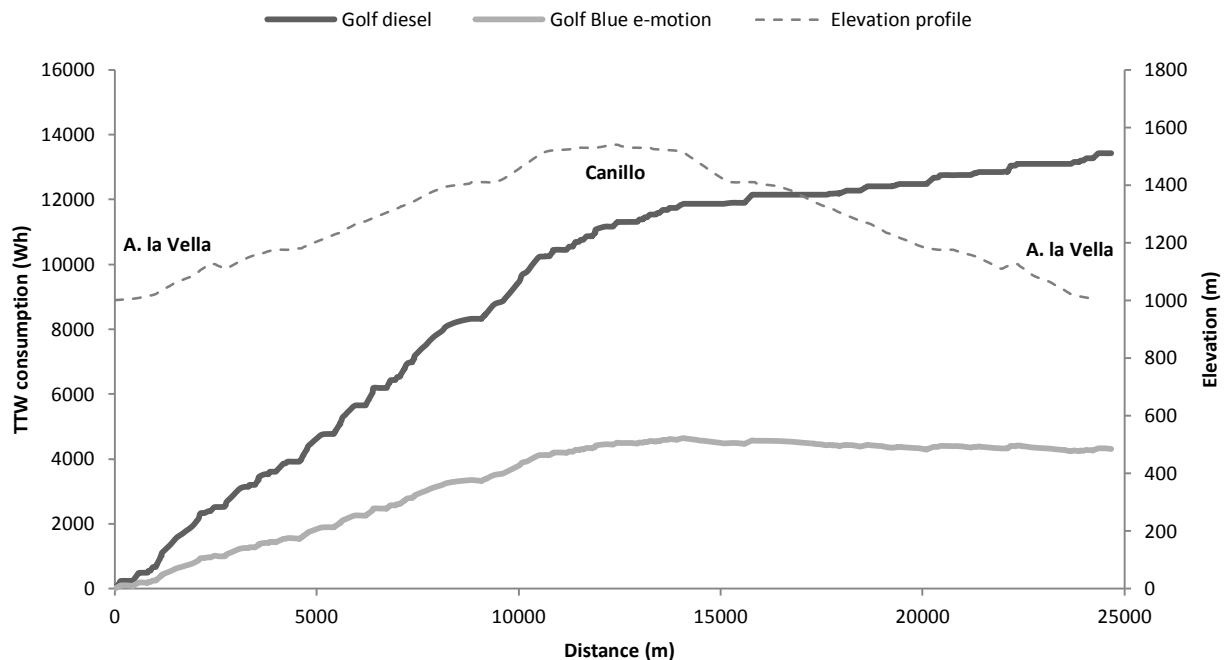


Fig. 5. Golf Diesel and Golf Blue e-motion TTW consumption in uphill-downhill route

This particular situation illustrates that if the round trip were started from Canillo with 100% battery level, less energy would be recovered because of the full battery. It would represent a loss in energy and lower improvement in TTW energy consumption for the EV compared to the ICEV. Fig. 6 shows the evolution of TTW energy consumption in this hypothetical trip for Golf EV. It can be observed that during downhill sections, EV energy consumption is very low, even 0 Wh at some points. In that situation, there is a loss in energy because battery is at 100% and no more energy can be stored. Fig. 7 shows the battery state of charge (SOC), assuming an initial SOC of 100% and Canillo as

the starting point of the route. EV accumulated energy consumption in the downhill-uphill route is 4506.5 Wh, 4.5% higher than in the uphill-downhill route. Under these circumstances, there is a lower improvement in TTW consumption compared to ICEV. Golf TTW ratio is reduced from 3.12 to 3.08.

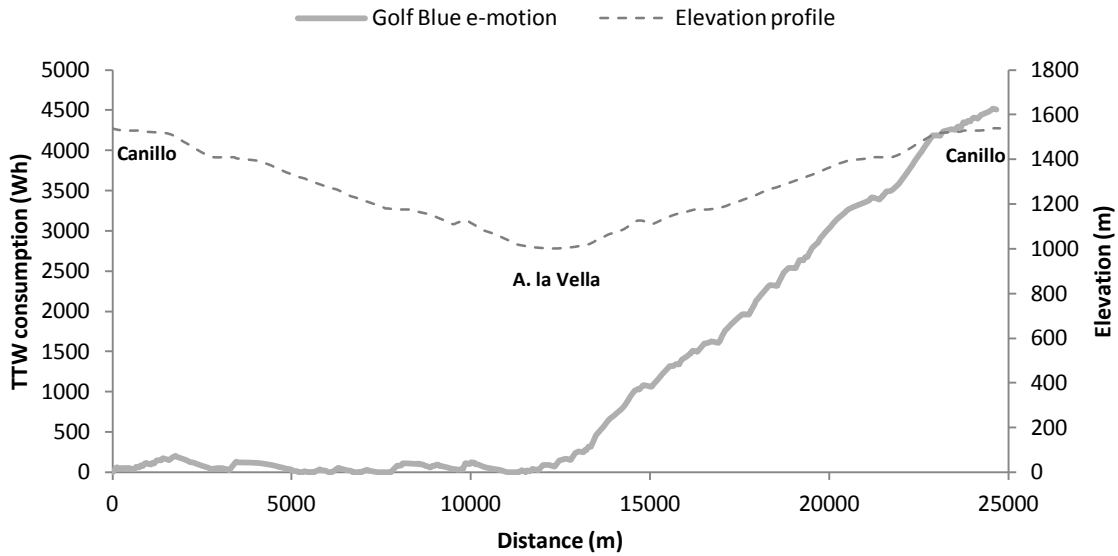


Fig. 6. Golf Diesel and Golf blue e-motion TTW consumption in downhill-uphill route

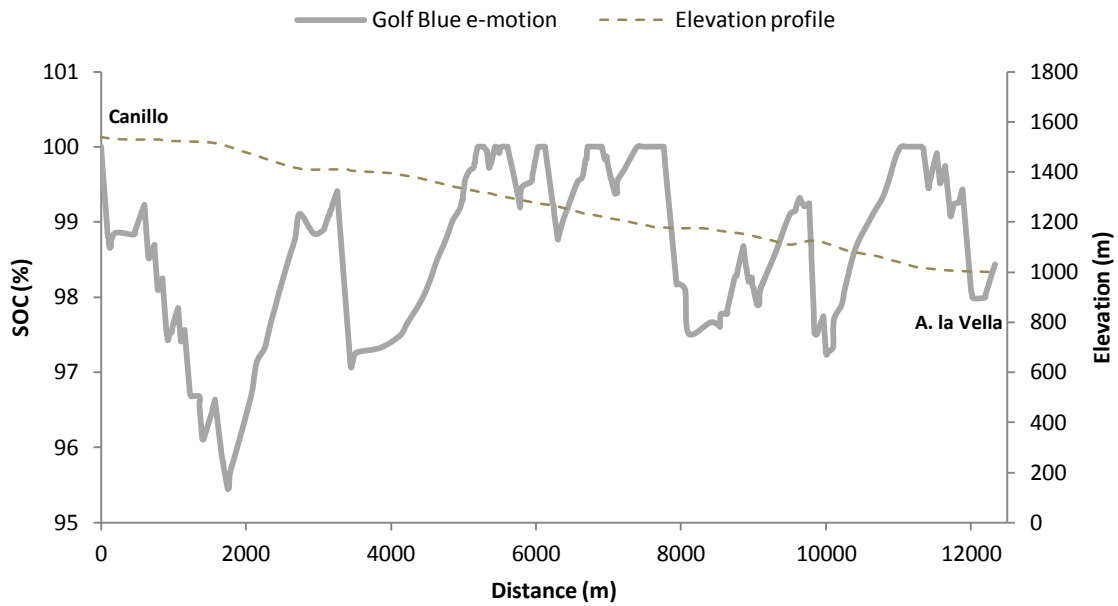


Fig. 7. Battery state of charge during downhill (Canillo–A. La Vella)

Together with the engine, regenerative braking is the key element in improving overall EV efficiency. In our simulations, and according to the literature, a value of 69% is taken for E_{RB} , resulting in a TTW ratio of 3.12, assuming Model 2.1 and VW Golf. Energy consumption and consequently TTW ratio is sensitive to this E_{RB} . In Fig. 8, a sensitivity analysis has been performed to determine how sensitive the model is to E_{RB} changes. A simulation of the same scenario has also been included but taking into account a flat profile. As expected, with medium and high E_{RB} values, the EV fares better with road grades than the ICEV due to the benefits of regenerative braking. As shown in Fig. 8, for E_{RB} values lower than 20%, the rugged terrain of the characterised route penalises the EV because the benefits of regenerative braking in this terrain are neutralised by greater energy demand resulting from its increase in mass. Nonetheless, all published data consider E_{RB} to be significantly greater than 20%. Thus, TTW ratios will always be higher in hilly regions than those for flat regions.

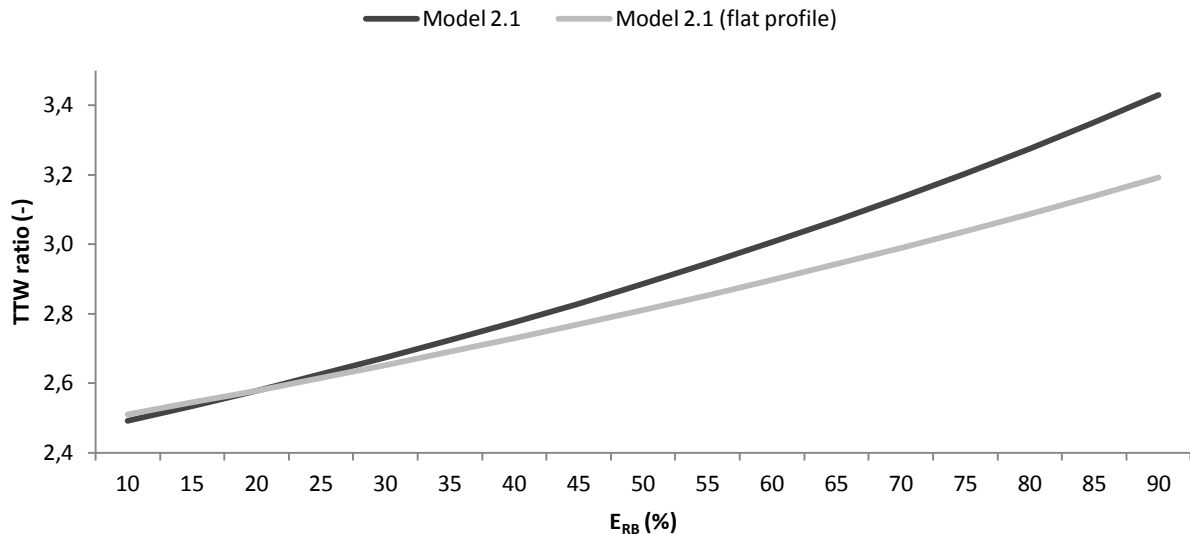


Fig. 8. Sensitivity analysis of E_{RB} comparing hilly and flat profiles

4. Conclusions

In this paper, a real route from Andorra has been characterised in order to improve understanding about vehicle dynamics in mountainous landscapes. Two conventional diesel vehicles and their electric-equivalent counterparts have been simulated and their performances have been compared. The results show that road grades have a major impact on energy consumption, although they affect performance in differing levels, depending on the technology analysed. Although EVs are heavier than ICEVs, they are less affected by road grades as they can recover energy during deceleration and downhill. Savings in TTW consumption for the EV compared to the ICEV are more than three times higher in all real scenarios simulated, with a peak value of 3.45 obtained in the scenario where high traffic congestion is considered. Low speed limits and the mainly urban driving conditions of the characterised route mitigate the negative impact of road grades on energy consumption, ensuring that the introduction of EVs in Andorra would provide more energy savings than those estimated using the NEDC.

The results obtained in Andorra's reference route simulations show that the European legislative cycle NEDC, used to certificate car fuel economy and emission levels in the EU, significantly underestimates TTW energy consumption. As a consequence, the EV range will be lower than that defined by manufacturers. Limited vehicle range is considered one of the major barriers against massive adoption of electric cars, and could represent an extra limitation for EV penetration in mountainous regions like Andorra. A reduction of 21.8% in EV range is estimated in the scenario where moderate acceleration and braking is considered. In a scenario where aggressive driving style is considered, this value could be as high as 26.9%. In terms of TTW energy consumption, the results using the Artemis urban driving cycle are very similar to those obtained in the real scenarios from Andorra. According to data presented in this study, the use of the Artemis urban driving cycle is an alternative to take into consideration in future studies involving transport energy consumption in Andorra.

The E_{RB} sensitivity analysis shows that, assuming medium and high E_{RB} values, EV energy benefits are higher in hilly regions than in flat profiles. Only when unrealistic low E_{RB} values are taken do rugged terrain penalise EV, because the benefits of regenerative braking in this terrain offset the greater energy demand due to the mass increase.

Under a scenario of widespread EV use in Andorra, some other relevant aspects such as well-to-wheels analysis and its importance with regard to greenhouse gases emissions, and its impact on power infrastructures and capacity, must be addressed in detail and will be explored elsewhere.

Acknowledgements

The authors would like to thank Jose Luis Romeral and Josep Gili, from Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech, and Erik Schaltz, from Aalborg University, for their invaluable suggestions and comments. One author (OTB) acknowledges also a pre-doctoral grant from the Government of Andorra (ATC0012-AND-2013/2014).

References

- Andorra Government, 2003. National topographic map. Scale: 1:5000. Contour lines with 25 m interval. Material from Ministeri d'Economia i Territori.
- Andorra Government, 2012. Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra.
- André, M., 2004. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Sci. Total Environ.* 334–335, 73–84. doi:10.1016/j.scitotenv.2004.04.070
- André, M., Joumard, R., Vidon, R., Tassel, P., Perret, P., 2006. Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. *Atmos. Environ.* 40, 5944–5953. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.12.057
- Bandivadekar, A., Bodek, K., Cheah, L., Evans, C., Groode, T., Heywood, J., Kasseris, E., Kromer, M., Weiss, M., 2008. On the road in 2035: reducing transportation's petroleum consumption and GHG emissions.
- Boriboonsomsin, K., Barth, M., 2009. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2139, 21–30. doi:10.3141/2139-03
- Burgess, S.C., Choi, J.M.J., 2003. A parametric study of the energy demands of car transportation: a case study of two competing commuter routes in the UK. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 8, 21–36. doi:10.1016/S1361-9209(02)00016-0
- Campanari, S., Manzolini, G., Garcia de la Iglesia, F., 2009. Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations. *J. Power Sources* 186, 464–477. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.09.115
- De Vlieger, I., De Keukeleere, D., Kretschmar, J.G., 2000. Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. *Atmos. Environ.* 34, 4649–4655.
- Department of Statistics, 2013. Andorra Government. URL <http://www.estadistica.ad> (accessed 10.28.13).
- European Commission, 2013. Road transport: Reducing CO₂ emissions from vehicles. URL http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index_en.htm (accessed 10.28.13).
- Frey, H.C., Zhang, K., Roupail, N.M., 2008. Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements. *Environ. Sci. Technol.* 42, 2483–9.
- Gerssen-gondelach, S.J., Faaij, A.P.C., 2012. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *J. Power Sources* 212, 111–129. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.03.085
- Hayes, J.G., de Oliveira, R.P.R., Vaughan, S., Egan, M.G., 2011. Simplified electric vehicle power train models and range estimation. 2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. 1–5. doi:10.1109/VPPC.2011.6043163
- IEA, 2009. Transport, Energy and CO₂. Paris.
- JRC, CONCAWE, EUCAR, 2013. Tank-to-wheels report version 4.0. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context. Luxembourg. doi:10.2788/40409
- Lorf, C., Martínez-Botas, R., Howey, D., 2013. Analysis of the energy consumption and CO₂ emissions of 40 electric, plug-in hybrid electric, hybrid electric and internal combustion engine vehicles. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 23, 12–19. doi:10.1016/j.trd.2013.03.004
- Mari Svensson, A., Møller-Holst, S., Glöckner, R., Maurstad, O., 2007. Well-to-wheel study of passenger vehicles in the Norwegian energy system. *Energy* 32, 437–445. doi:10.1016/j.energy.2006.07.029
- National Research Council, 2006. Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy. *Transp. Res. Board.*
- Nuzzolo, A., Musso, A., Crisalli, U., Rossi, R., Carrese, S., Gemma, A., La Spada, S., 2013. Impacts of driving behaviours, slope and vehicle load factor on bus fuel consumption and emissions: a real case study in the city of Rome. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 87, 211–221.
- Park, S., Rakha, H.A., 2006. Energy and environmental impacts of roadway grades. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1987, 148–169. doi: 10.3141/1987-16
- Pearre, N.S., Kempton, W., Guensler, R.L., Elango, V. V., 2011. Electric vehicles: How much range is required for a day's driving? *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 19, 1171–1184. doi:10.1016/j.trc.2010.12.010
- Shafiei, E., Thorkelsson, H., Ásgeirsson, E.I., Davidsdottir, B., Raberto, M., Stefansson, H., 2012. An agent-based modeling approach to predict the evolution of market share of electric vehicles: A case study from Iceland. *Technol. Forecast. Soc. Change* 79, 1638–1653. doi:10.1016/j.techfore.2012.05.011
- Smith, W.J., 2010a. Plug-in hybrid electric vehicles—A low-carbon solution for Ireland? *Energy Policy* 38, 1485–1499. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.031
- Smith, W.J., 2010b. Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO₂ emissions from transport? *Energy* 35, 4514–4521. doi:10.1016/j.energy.2010.07.029
- Smokers, R., Vermeulen, R., Mieghem, R., Gense, R., Skinner, I., Fergusson, M., MacKay, E., Brink, P., Fontaras, G., Samaras, Z., 2006. Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂-emissions from passenger cars, Final Report, Report to the European Commission.

- Sovacool, B.K., Hirsh, R.F., 2009. Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. *Energy Policy* 37, 1095–1103. doi:10.1016/j.enpol.2008.10.005
- Thiel, C., Perujo, A., Mercier, A., 2010. Cost and CO₂ aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios. *Energy Policy* 38, 7142–7151. doi:10.1016/j.enpol.2010.07.034
- Tolouei, R., Titheridge, H., 2009. Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 14, 385–399. doi:10.1016/j.trd.2009.01.005
- Tzirakis, E., Pitsas, K., Zannikos, F., Stournas, S., 2006. Vehicle emissions and driving cycles: comparison of the Athens driving cycle (ADC) with ECE-15 and European driving cycle (EDC). *Glob. NEST J.* 8, 282–290.
- UNECE, 2013. Addendum 100: Regulation No. 101.
- Van Sterkenburg, S., Rietveld, E., Rieck, F., Veenhuizen, B., Bosma, H., 2011. Analysis of regenerative braking efficiency — A case study of two electric vehicles operating in the Rotterdam area. 2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. 1–6. doi:10.1109/VPPC.2011.6043109
- Van Vliet, O., van den Broek, M., Faaij, A., Brouwer, A.S., Kuramochi, T., 2011. Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars. *J. Power Sources*. 8, 21–36. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.09.119