



## Guillem Francisco i Giné

Graduat en Enginyeria de l'Energia per la Universitat Politècnica de Catalunya i investigador a l'Observatori de Sostenibilitat d'Andorra



Guillem Francisco i Giné

## Potencial d'aprofitament solar en cobertes d'Andorra

### Resum

El principal objectiu del projecte és caracteritzar el potencial de l'energia fotovoltaica en les cobertes dels edificis del Principat d'Andorra. A diferència d'altres zones geogràfiques, la disponibilitat d'aquest recurs en zones de muntanya és molt heterogènia i resulta altament influenciada per la topografia i la variabilitat arquitectònica.

S'han realitzat tres anàlisis durant l'estudi per tal de caracteritzar en tots els àmbits les hipotètiques instal·lacions: anàlisi d'aprofitament del recurs solar, anàlisi econòmica i anàlisi mediambiental. A més, s'ha analitzat l'impacte de les polítiques de subvenció a la fotovoltaica i com afecten les rendibilitats de les instal·lacions.

Finalment, s'han creat diverses eines per divulgar els resultats a la població andorrana: una plataforma web pública en línia on es mostra un SIG amb els detalls de les hipotètiques instal·lacions i una eina per visualitzar els resultats sobre un model 3D interactiu.

## 1. Introducció i antecedents

Actualment, la situació energètica d'Andorra es caracteritza per una dependència gairebé total de l'exterior (>95%) i una alta supeditació als combustibles fòssils, un recurs finit i subjecte a una alta volatilitat tant en preu com en disponibilitat. En el cas de l'energia elèctrica, tan sols un 15% de la demanda nacional és generada de manera autòctona, gairebé íntegrament a partir de l'energia hidroelèctrica. El Pla estratègic de l'energia d'Andorra, 2006-2015 (1) ja identificava com a eix prioritari la diversificació de fonts energètiques, amb un especial interès a fomentar el desenvolupament de les energies renovables. El Llibre blanc de l'energia d'Andorra (2) aprofundeix en aquest àmbit estratègic i fa una primera estimació del potencial de les diverses fonts energètiques alternatives per al país.

L'energia solar ha demostrat tenir la capacitat de convertir àrees amb usos eminentment residencials i comercials en punts de generació d'energètica local. Grans ciutats com Barcelona o Boston han caracteritzat massivament les cobertes dels seus edificis per tal de determinar el potencial fotovoltaic i solar tèrmic de què disposen, i han mostrat els resultats obtinguts a través de plataformes web públiques per tal de fomentar la implantació de projectes de generació energètica a petita escala.

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

L'any 2013 va entrar en vigor a Andorra la reglamentació que regula les instal·lacions fotovoltaiques incorporades en edificacions i que en garanteix la venda de l'energia generada (Llei 5/2013). Aquesta Llei ha representat un impuls important en el desenvolupament de l'energia fotovoltaica al país. Tot i així, des d'un punt de vista tècnic, s'identifica una absència d'informació referent al potencial solar de les edificacions existents.

El Reglament de regulació de l'activitat de generació

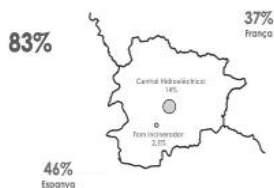


Figura 1. Origen de l'electricitat, 2016

d'energia elèctrica d'origen fotovoltaic en instal·lacions integrades en edificacions i interconnectades a la xarxa de baixa tensió estableix les prescripcions tècniques i administratives que regulen la producció d'electricitat en instal·lacions que estiguin incorporades en tancaments o cobertes d'edificacions. Així mateix, el Decret del 13-03-2013 preveu la publicació periòdica de convocatòries per a la inscripció de les instal·lacions al Registre d'Instal·lacions Fotovoltaïques (RIFV), amb indicació de la quota de potència i de la tarifa de compra (esquema *feed-in tariff*). El Govern compensa econòmicament les empreses distribuïdores pel sobrecost generat per la compra d'energia fotovoltaica mitjançant l'abonament de la diferència entre el cost suportat per la compra d'energia d'origen fotovoltaic i el cost que haurien satisfet per la mateixa quantitat d'energia elèctrica a la tarifa C de les tarifes elèctriques oficials aplicables a les empreses distribuïdores.

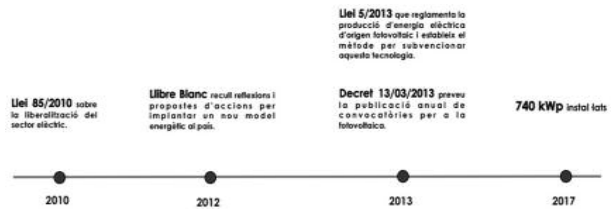
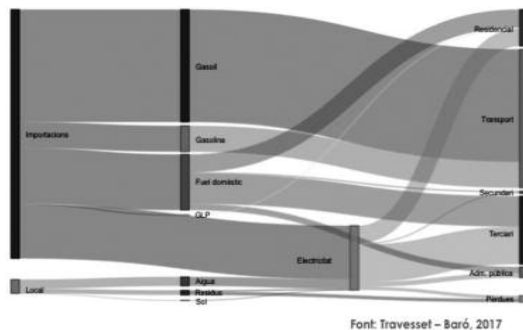


Figura 3. Model energètic 2015.  
Font: Travesset-Baró, 2017

A la pràctica, l'energia solar fotovoltaica es comença a desplegar a Andorra a partir de l'any 2013. A finals del 2015 es disposava d'una potència instal·lada de 342 kWp, amb la qual es van generar 250 MWh al llarg de l'any.

Figura 2. Canvi de model energètic



Aquest article s'emmarca en el projecte "Potencial d'aprofitament solar en cobertes d'edificis del Pirineu" de la CTP (Comunitat de Treball dels Pirineus) amb l'objectiu principal de caracteritzar el potencial de l'energia solar, tant la fotovoltaica com la tèrmica, integrada en edificis a diferents zones del Pirineu i molt especialment a Andorra. Aquest projecte s'ha centrat a caracteritzar el potencial de l'energia solar fotovoltaica integrada en edificis a tot el país. A diferència d'altres zones geogràfiques, la disponibilitat d'aquest recurs en zones de muntanya és molt heterogènia, i està altament influenciada per la topografia i la variabilitat arquitectònica. En aquest sentit, aquest projecte analitza diferents casos amb l'objectiu d'entendre millor la influència d'aquests aspectes sobre el potencial solar i, per tant, poder establir un mètode que s'adapti adequadament a zones d'alta muntanya. Un dels elements clau del projecte és la implementació d'una plataforma pública en línia per mostrar la distribució de la capacitat d'aprofitament d'aquest recurs en les diferents zones d'estudi. Aquesta eina permet aportar informació als usuaris sobre el potencial energètic, la rendibilitat econòmica o els estalvis mediambientals de les hipotètiques instal·lacions fotovoltaïques en les cobertes dels seus edificis.

## **2. Metodologia desenvolupada**

### **2.1. Estat de l'art**

Actualment, grans ciutats com Barcelona o Boston estan caracteritzant massivament el potencial solar de les cobertes de les respectives ciutats per permetre als ciutadans consultar dades relacionades amb les hipotètiques instal·lacions a través de pàgines web. Ambdós projectes utilitzen dades de la radiació anual, la modelització *Light Detection and Ranging* (LiDAR) i la delimitació de les cobertes per obtenir resultats estimatius del potencial màxim d'energia fotovoltaica i solar tèrmica per a cadascun dels edificis o construccions.

Així doncs, les metodologies més acurades d'estimació del potencial solar en ciutats actuals estan basades en el *GIS-based methods* i segueixen detalladament la metodologia descrita en l'article "Methodology for estimating solar potential on multiple rooftops for photovoltaic systems", de Jeffrey B. Kodysh (3).

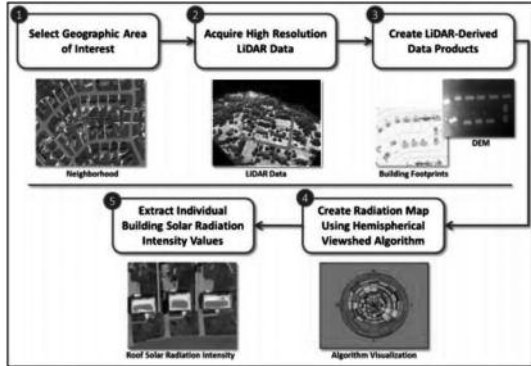


Figura 4. Esquema de la metodologia

Font: "Methodology for estimating solar potential on multiple rooftops for photovoltaic systems", de Jeffrey B. Kodys

Aquesta tipologia d'estudis presenta una gran complexitat, ja que els algorismes que s'utilitzen per calcular la radiació solar són molt potents i permeten obtenir resultats molt acurats amb la realitat.

Altres estudis, com "Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis", de Taehoon Hong (4), introdueixen un pas previ a la simulació que consisteix bàsicament en un estudi d'ombres. S'analitza com aquestes ombres provocades pels mateixos edificis o l'entorn influeixen en el percentatge de l'àrea disponible a l'hora d'instal·lar els panells fotovoltaics. En la figura 5 podem observar l'estudi d'ombres per a una zona determinada al llarg d'un dia.

En relació amb l'aplicació d'aquesta metodologia en zones d'alta muntanya, s'ha realitzat l'estudi "Evaluation of photovoltaic integration potential in a village", de Georgios Mavromatidis (5), en què s'introdueix el factor d'influència de la topografia del terreny. Es construeix *Digital Elevation Model* (DEM) amb els edificis i les muntanyes de la regió d'estudi i es fa la simulació. Per tant, realitzant aquest tipus d'estudis en zones d'alta muntanya es pot quantificar la influència de la topografia del terreny. Tot i això, en aquest estudi no s'indica quins factors han seguit per tal de delimitar la zona muntanyosa del DEM, i per tant podrien estar obviant algunes altres zones que també podrien influenciar en els resultats.

## 2.2. Descripció de la metodologia aplicada

### 2.2.1. Caracterització del recurs solar

Seguidament es detallen els passos seguits per poder obtenir el recurs solar disponible per a cada una de les cobertes del Principat. A la figura 5 s'exemplifica de forma gràfica:

1. Caracterització de les cobertes. Generació d'una capa vectorial 2D amb format SIG (sistemes d'informació geogràfica) que delimiti adequadament la geometria dels edificis.
2. Caracterització del terreny i dels edificis. Generació d'un model digital d'elevacions (MDE) mitjançant dades LiDAR. Aquesta tecnologia permet generar models d'alta precisió en tres dimensions, i permet captar factors essencials en la interacció entre la radiació solar i les cobertes; ombres generades pel terreny o bé per infraestructures pròximes.
3. Simulació de la irradiació. Per calcular la radiació incident en l'àrea d'estudi s'ha utilitzat l'eina Solar Analyst d'ArcGis, la qual estima el valor d'irradiació per a cada punt de l'MDE.
4. Extracció de la radiació incident en les cobertes. Un cop tenim la simulació anual de la regió d'interès, el pas següent és combinar la capa vectoritzada de les cobertes amb la capa de la radiació solar.
5. Extracció de la radiació lliandar incident en les cobertes. Filtració dels punts del ràster de la radiació solar que no assoleixin el llindar mínim de 1.000 hores pic solar (HSP), equivalent a 1 kWh/m<sup>2</sup>, per tal d'eliminar les parts no rendibles de les cobertes.

### 2.2.2. Anàlisi tècnica

L'objectiu d'aquest projecte era calcular el potencial energètic, la rendibilitat econòmica i els estalvis mediambientals de les possibles instal·lacions en les diferents cobertes de les regions d'estudi. Per aquest motiu, en aquest capítol es justificaran tots els càlculs que s'han efectuat a partir de les simulacions mensuals de l'any 2015 per obtenir els resultats finals.

**Anàlisi d'aprofitament del recurs.** A partir de la superfície de la coberta, la irradiació solar útil i el mòdul Peak Energy BLK2 Series de la marca REC, s'obté tres indicadors molt rellevants: nombre de mòduls fotovoltaics, potència instal·lable i electricitat generada durant un any.

**Anàlisi econòmica.** L'anàlisi econòmica és un dels aspectes

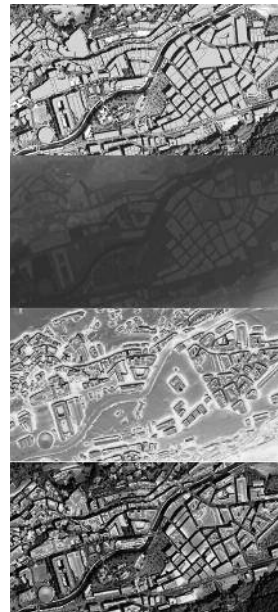


Figura 5. Etapes de la caracterització del recurs solar per coberta

més importants que s'han de tenir en compte, ja que ens permetrà classificar les instal·lacions segons la rendibilitat econòmica. Dins d'aquesta anàlisi es tenen en compte diversos factors: els costos de les instal·lacions (compra dels mòduls i instal·lació) amb la finalitat de poder calcular la inversió total, els costos de manteniment associats a les instal·lacions (revisions, canvi de peces...) i, finalment, un dels aspectes més importants, les polítiques de subvencions. Fins al 2018, el Govern proposava una política de subvencions basada en l'esquema *feed-in tariff*; és a dir, l'energia generada per les instal·lacions s'introdueix a la xarxa elèctrica i a canvi es rep una compensació econòmica de 0,0808 €/kWh. A partir del 2018, el Govern canvia a una política de subvenció directa amb què se subvenciona fins al 40% del preu final de la instal·lació, aplicant un llindar màxim de 20.000 €. A partir d'aquests factors es calculen quatre indicadors: inversió estimada, ingressos anuals, període de retorn i el benefici acumulat al final de la vida útil de la instal·lació.

**Anàlisi mediambiental.** Quant a l'anàlisi mediambiental, s'estudien dos factors. En un primer instant es calculen les tones de CO<sub>2</sub> que estalviariem en cas que es realitzés la instal·lació, tenint en compte les emissions associades a l'electricitat consumida a Andorra en funció de la seva procedència. Seguidament es calcula el nombre de pisos al qual es podria garantir el subministrament d'energia elèctrica a partir de la generació de la pròpia instal·lació en funció del consum de la mitjana d'energia elèctrica per habitatge a Andorra.

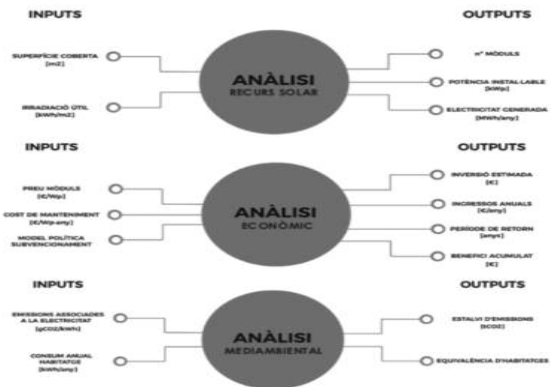


Figura 6. Inputs/outputs per a les diferents anàlisis

### 3. Resultats i discussió

La taula 1 recull els indicadors més rellevants agregats per parròquies, obtinguts després d'efectuar les diferents anàlisis. Sumant el potencial solar fotovoltaic d'aquestes parròquies es podrien generar anualment 98 GWh. Si comparem aquesta generació amb el consum elèctric del 2016, observem que representa el 18%. Els resultats obtinguts no es corresponen amb les dades presentades en el Llibre blanc de l'energia d'Andorra, en què es calculava que es podrien generar fins a 18 GWh anuals tenint en compte tot el potencial solar fotovoltaic del país.

Parròquia	Electricitat generada [GWh/any]	Llars	Percentatge de demanda [%]	Estalvi d'emissions [tCO <sub>2</sub> ]
Ordino	7,4	1.500	22	26.696
Andorra la Vella	36	7.500	22	130.258
Sant Julià de Lòria	10	2.100	15	36.079
Escaldes-Engordany	17	3.600	17	62.629

Taula 1. Indicadors agregats per parròquies

Un altre factor que ens ha resultat molt interessant és l'estalvi d'emissions que es podria obtenir. En el mateix Llibre blanc de l'energia d'Andorra s'indica que durant el 2011 Andorra va emetre al voltant 521.900 tones de CO<sub>2</sub> equivalent. Tenint en compte un estalvi anual del conjunt de les instal·lacions de 12.783,1 tones de CO<sub>2</sub> equivalent, aleshores podríem reduir fins a un 2,5% d'aquestes emissions.

Pel que fa a la rendibilitat i el període de retorn, s'estableix una classificació (taula 2) que ens permetrà classificar les instal·lacions en funció del període de retorn.

<b>Molt bo</b>	< 8 anys
<b>Bo</b>	8-10 anys
<b>Moderat</b>	10-13 anys
<b>Baix</b>	13-20 anys
<b>No aprofitable</b>	> 20 anys

Taula 2. Classificació segons retorn

Segons la classificació esmentada, en les figures 7 i 8 es mostren les rendibilitats econòmiques de les instal·lacions en funció de les diferents polítiques públiques plantejades pel Govern. Destaca que en ambdós escenaris les rendibilitats són



Figura 7. Rendibilitat econòmica amb polítiques de subvenció el 2017

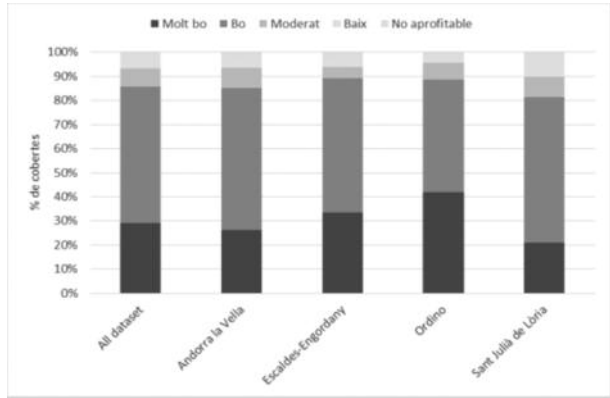
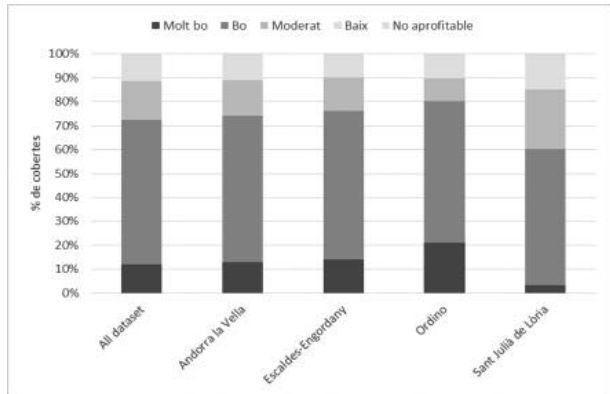


Figura 8. Rendibilitat econòmica amb polítiques de subvenció el 2018



molt bones, i tan sols un 7% de les cobertes del país són no rendibles fins al final de la vida útil dels panells fotovoltaics. A més, la major part de les cobertes presenten períodes de retorn d'entre vuit i deu anys. Remarquem que la política de subvenció prèvia al 2018 presenta resultats molt més bons pel que fa al període de retorn.

Si fem una comparació binària entre les diferents polítiques de subvenció (figura 9) -és a dir, per cada coberta comparem el període de retorn pels dos escenaris-, resulta que el 70% de les cobertes empitjora la rendibilitat i el 30% la millora.

Tanmateix, a la figura 10 podem observar que la política de subvenció plantejada el 2018 té com a intenció promoure les

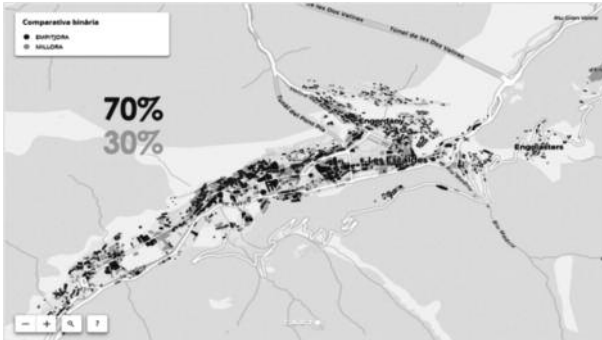


Figura 9. Comparativa binària entre polítiques de subvenció

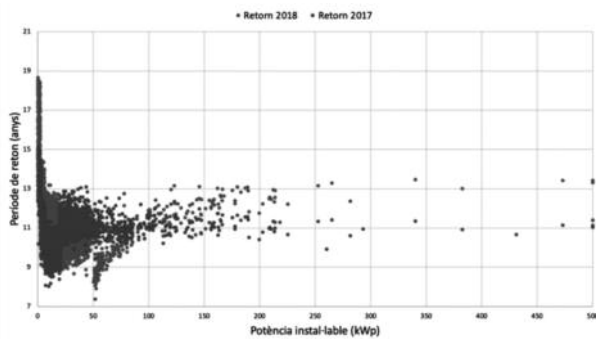


Figura 10. Període de retorn vs. potència instal·lable

instal·lacions de mida petita (<20 kWp) i “penalitzar” les instal·lacions més grans per evitar obtenir grans beneficis al final de la vida útil de les instal·lacions.

En general cal destacar que el potencial solar del país es pot considerar bo, i més si tenim en compte que són zones d'alta muntanya en les quals la topografia del terreny limita consideradament aquest recurs durant certes èpoques de l'any. S'ha demostrat la gran dependència que tenen les instal·lacions fotovoltaïques de l'aspecte econòmic: preus de mòduls fotovoltaïcs, costos de manteniment, tipologia de la subvenció..., tot i que a llarg termini aquesta tecnologia acabarà sent més competitiva, ja que els preus per kW de potència disminuiran i l'eficiència dels mòduls augmentarà.

## Bibliografia

- 1- Govern d'Andorra. Pla estratègic de l'energia d'Andorra, 2006-2015. A: . 2007.
- 2- Govern d'Andorra. Llibre blanc de l'energia d'Andorra. A: . 2012.
- 3- KODYSH, J.B. *et al.* "Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic Systems". A: *Sustainable Cities and Society* [en línia]. Elsevier B.V., 2013, vol. 8, p. 31-41. ISSN 22106707. DOI 10.1016/j.scs.2013.01.002. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.002>
- 4- HONG, T. *et al.* "Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis". A: *Applied Energy* [en línia]. Elsevier Ltd, 2017, vol. 194, p. 320-332. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.07.001. Disponible a: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916309424>
- 5- MAVROMATIDIS, G.; OREHOUNIG, K. I CARMELIET, J. "Evaluation of photovoltaic integration potential in a village". A: *Solar Energy*. Elsevier Ltd, 2015, vol. 121, p. 152-168. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2015.03.044

Amb la realització d'aquest projecte s'obtenen diversos resultats útils per a la ciutadania i també per a l'Administració pública. En un primer moment, i gràcies a la implementació de la pàgina web [www.obsa.ad/solar](http://www.obsa.ad/solar) i de les projeccions del CityScope (un model 3D del país), els ciutadans tenen accés a informació sobre les diferents instal·lacions fotovoltaïques en els edificis del Principat, i es fan una primera idea del potencial d'aquestes instal·lacions i de les rendibilitats econòmiques. D'altra banda, l'Administració pública podrà fer servir els resultats de cara a perfeccionar les noves estratègies per poder assolir els objectius amb vista a l'Horitzó 2050, ja que els estudis que s'han realitzat fins ara sobre la fotovoltaïca discrepen dels obtinguts en aquest projecte.

A banda dels resultats obtinguts, cal remarcar que aquesta tipologia de projectes és de gran importància per fomentar la recerca i la col·laboració entre diverses institucions dins del país.