

# La enerxía eólico n'Asturies

## *Centrales hidroeóliques*

---

Por **Pedro M<sup>a</sup> Suárez Rodríguez**  
& **Luis Bayón Arnau**  
Departamentu de Matemátiques  
Área de Matemática Aplicada  
Universidá d'Uviéu



## 1. ENTAMU

Llamaremos central hidroeléctrica a una instalación xeneradora de lletricidá basada nel usu de la enerxía eólico y la enerxía que vien d'una central hidroeléctrica de bombéu. Les centrales hidroeléctriques presenten abondes ventayes.

Pa ser a entendedes, ye necesario saber cómo funciona'l mercáu lléctricu güei: a nueva normativa española permite a los parques eólicos vender la enerxía xenerao, polo qu'han de comportase como cualquier otru axente xenerador. En consecuencia, tienen de preparar les sos ufiertes, programar la producción y venta d'enerxía nel mercáu lléctricu.

La enerxía eólico tien unes carauterístiques especiales que lo estremen d'otru tipu de productores d'enerxía lléctricu. La diferencia cimera ye la imprevisibilidá de la producción nos parques eólicos. Hai dellos modelos de predicción, pero la dificultá principal a la hora de predicir la enerxía eólico ta en que la potencia ye proporcional al cubu de la velocidá del vientu; esto tradúzse en que variaciones pequeñes na velocidá del vientu producen grandes esviamientos na predicción d'enerxía. En casu d'escesu o escasez, otros productores tienen d'amenorgar o aumentar la so producción pa iguar l'esviamientu, lo que se tradúz en perdes económiques; estes perdes dan llugar a lo que se conoz como penalizaciones por esviamientu que tendrán de pagar, tanto los parques eólicos como cualquier otru productor d'enerxía que s'esvíe de les sos previsiones.

Énte esta situación, los parques eólicos tienen delles opciones, en teniendo esviamientos nel mercáu diariu, puen:

- dir al mercáu intradiariu (d'esti mou puen comprar o vender de nuevo la enerxía y

asina compensar errores de predicción)

- pagar les penalizaciones por esviamientu o
- tratar d'almacenar la enerxía eólico.

Propunxéronse dellos métodos p'almacenar enerxía: aire comprimíu, bateríes pa coches lléctricos, volantes, sistemes d'almacenamientu de calor, imanes superconductores, l'hidróxenu y el que s'analiza nesti trabayu, «l'agua bombiao».

Nesti artículu presentamos el nuesu estudiu de la optimización conxunta d'una central hidráulica de bombéu y un parque eólicu, ello ye, la optimización de les llamaes centrales hidroeléctriques.

Estes constitúin un elementu clave por delles razones:

- Suponen un métodu perbonu p'almacenar enerxía.
- Permiten amenorgar los costos por esviamientu de les centrales eóliques y
- Ayuden a regular el cada vegada más caóticu mercáu enerxéticu español.

## 2. EL MERCÁU LLÉTRICU ESPAÑOL

### 2.1 Los mercaos

L'actual mercáu lléctricu entamó a funcionar en 1997, cuando entró n'usu la Llei del Mercáu Lléctricu y afítase na competencia ente les empreses. Tien como oxetivu incrementar la calidá del suministru, la meyora del mediu ambiente y sobre manera facer que los precios s'autorregulen nun mercáu llibre.

Esta nueva regulación implica que muchos determinos qu'enantes se tomaben pola alministración agora tán lliberalizaos y déxense a criteriu de les empreses. Nesti nuevu marcu económu son les compañíes xeneradores les qu'individualmente planifiquen la operación de los sos recursos cola

intención de maximizar el so beneficiu.

Nesti puntu esplicaremos los principales organismos que regulen el mercáu de la lletricidá. En realidá hai dellos mercaos polos que productores y consumidores apauten un determináu preciu por una determinada cantidá d'enerxía:

**Mercaos non organizaos:** son contratos bilaterales qu'apauten un productor y un consumidor pa un periodu de tiempu determináu (por exemplu, seis meses).

**Mercaos de producción diarios ya intradiarios (mercáu spot),** qu'entama l'Operador del mercáu ibéricu d'enerxía (OMIE). Son mercaos horarios onde se deciden precios y cantidaes pa toes y caúna de les hores de añu.

**Mercaos d'operación del sistema,** que xestionona Red Eléctrica Española (REE) y tán empobinaos a organizar los axustes d'hora cabera p'asegurar el mentáu equilibriu instantáneu ente xeneración y consumu: mercaos de servicios complementarios, solución de restricciones téuniques, xestión d'esviamientos, etc.

Na península ibérica, lo más de la lletricidá xestionase nel mercáu *spot* –mercaos diario ya intradiarios– (nel 2005, por exemplu, esta cantidá yera del 90%). Por ello centrarémonos sobre too n'esplicar estos mercaos.

Del funcionamientu del sistema lléctricu nacional encárguense dos entidaes independientes, que son l'Operador del Mercáu (OM) y l'Operador del Sistema (OS).

La parte téunica del sistema lléctricu desendócala l'Operador del Sistema (OS), Red Eléctrica de España S.A., a la que correspuende la realización de toes aquelles funciones que remanecen del funcionamientu de los servicios d'axuste del sistema, de les esviaciones producíes nel mercáu de producción d'enerxía lléctricu, lo mesmo que la lliquidación y comunicación de

les obligaciones de pagamientu y derechos de cobru a que dean llugar los servicios d'axuste del sistema y la garantía de potencia.

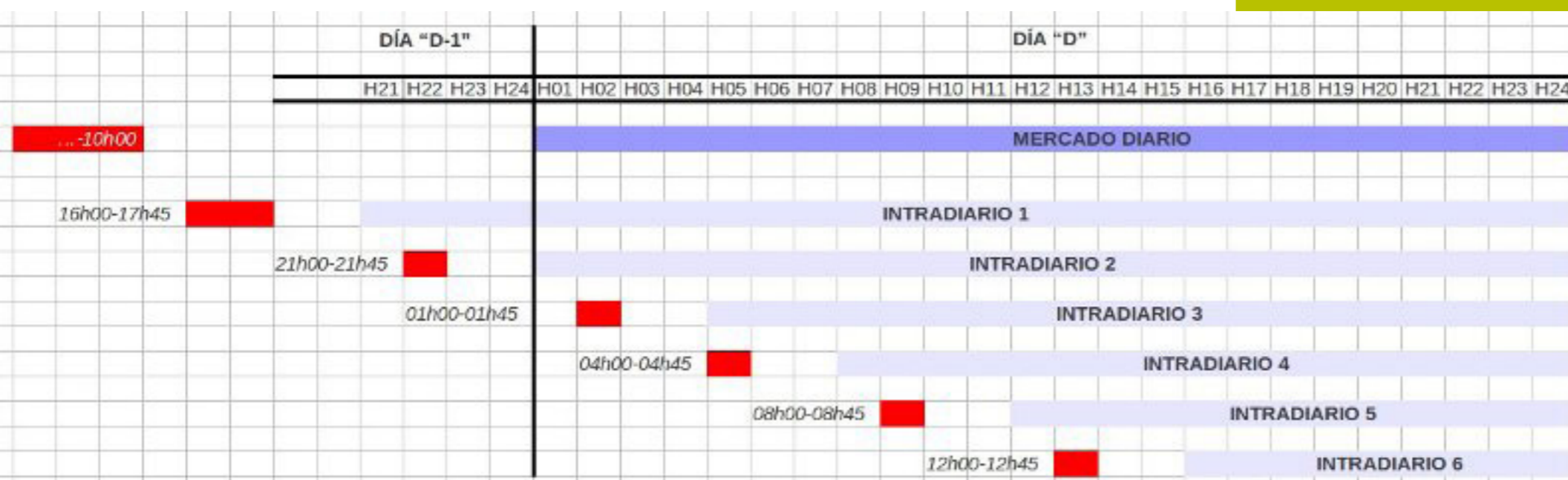
El mercáu de lletricidá ta iguáu por una secuencia de mercaos nos que la xeneración y la demanda intercambien enerxía lléctricu n'estremaos plazos temporales. Veamos con daqué más detalle los distintos mercaos.

### 2.1.1 Mercáu Diariu

Al llegar el día D-1 (un día enantes de la entrega física de la enerxía / despachu de les centrales), los axentes intercambien enerxía pal día D nel mercáu diariu. Amás, nel plazu curtiu, dentro de les 24 hores anteriores al momentu del despachu de la enerxía, los xeneradores y los comercializadores puen axustar les sos posiciones comerciales comprando y vendiendo enerxía nos seis mercaos intradiarios existentes na actualidá, y de funcionamientu mui asemeyáu al del mercáu diariu.

L'Operador del Sistema, comunica a les 8:30 hores del día D-1 la previsión de demanda pal día D (día de la entrega física de la enerxía), les indisponibilidaes de xeneración y la situación de la rede de tresporte. Los axentes que quieran participar nel mercáu diariu presenten al Operador del Mercáu ente les 8:30 y les 10:00 hores les ufiertes de compra o venta d'enerxía, procediendo ésti a la casación de diches ufiertes, determinándose nesti momentu'l preciu y el volume d'enerxía que s'aceuta.

El tipu d'ufiertes que puen presentase nel mercáu diariu son les llamaes «Ufiertes Simples con Regles adicionales». Una ufierta simple ye una pareya cantidá-preciu que s'aceuta o refugana máis en función del preciu resultante nel mercáu. Sicasí, les ufiertes simples presenten dalgu-



ARRIBA

Figura 1. Horizonte del mercáu diariu y los intradiarios.

Fonte: www.observaelmercadoelectrico.net

(Fonte en castellanu).

nes estorbises pola mor de que la lletricidá tien carauterístiques propies que lo estrema d'otros bienes. Pa iguar estos inconvenientes, nel mercáu español amiéstense riegles adicionales a esta ufierta simple: Condición d'indivisibilidad, Gradiente de carga, Ingresos mínimos y Parada programada.

Les tresaiciones, asignaes o casaes, de compraventa d'enerxía dan llugar al *Programa Base de Casación*. N'analizando esti programa dende'l puntu de vista de seguridad del suministru pol Operador del Sistema y n'iguando les restricciones téuniques, per aciu de la reasignación de los grupos xeneradores énte esviamientos de la demanda, obtiense'l *Programa Diariu Viable Definitivu*.

### 2.1.2 Mercaos Intradiarios

Estos mercaos xestionaos pol Operador del Mercáu, tán empobinaos a que los participantes del mercáu diariu, que presenten desaxustes ente lo ufiertao y lo adquirío, puedan facer axustes a los sos compromisos de producción/adquisición de magar se conozan los resultaos del mercáu diariu. El mercáu diariu pa les 24 hores del día «D» zarra a les 10h del día "D-1", y las casaciones conócense alreduro de les 14h. Como se ve na figura, caún de los 6 mercaos intradiarios tien un plazu temporal determináu pa facer nuevas ufiertes.

Los esviamientos puen ser por causa de munches razones. Una avería d'una central de producción, averías de la rede, un aumentu de caudal d'agua qu'aumente la producción hidráulica, un cambéu de previsión de temperatura qu'afeuta al consumu o un cambéu na previsión del vientu qu'afeutará a la producción de parques eólicos.

Esti mercáu intradiariu ta iguáu en seis sesiones y namái puen presentar ufiertes de compra o venta d'enerxía aquellos axentes que participen na sesión del mercáu diariu. El programa de tresaiciones resultante de cada mercáu intradiariu tien que lu analizar REE pa garantizar el cumplimientu de los criterios de seguridad, y depués d'ello obtiense'l Programa Horariu Final.

### 2.1.3 Mercaos d'Operación

Nestos mercaos inxértense toles operaciones de xestión téunica del sistema, xestionaos por REE, y que tien como oxetivu que'l suministru d'enerxía llétrico se produza nes condiciones de calidá, fiabilidad y seguridad necesaries y que se verifique de forma permanente la ecuación d'equilibriu ente la potencia xenerao y la demanda.

Esta operación del sistema céntrase en tres tipos d'actuaciones per parte del OS:

- Xestión de restricciones téuniques. Per-

mite resolver les conxestiones ocasionaes poles llimitaciones de la rede de tresporte sobre la programación prevista pal día viniente, al igual que les que surdan en tiempu real. Una y bones l'OMEL resuelve la casación, y teniendo en cuenta los contratos bilaterales físicos, l'OS fai'l procesu d'análisis de restricciones téuniques de la rede de tresporte nel que se verifica la viabilidad del programa de xeneración y consumu resultante emplegando modelos de fluxos de rede y otros algoritmos que simulen l'estáu en que quedaría'l sistema llétrico énte determinaos fallos predefiníos en dellos elementos de la rede, como son disparos de grupos xeneradores, de llinies y/o de tresformadores. En casu de que'l programa resultante del mercáu diariu nun seya téunicamente factible, l'OS resuelve les conxestiones de la rede alterando'l programa de xeneración aplicando criterios téuniques de seguridad, pero tamién económicos.

- Xestión de los servicios complementarios. Los servicios complementarios, ufiertaos polos xeneradores y xestionaos pol OS, tienen como oxetivu que'l suministru se faiga en condiciones de seguridad y fiabilidad en tou momentu y que puedan iguase desequilibrios ente la xeneración y la demanda en tiempu real.

- Xestión d'esviamientos. Resuelve, cuasi en tiempu real, los desaxustes ente la ufierta y la demanda de lletricidá. Na operación normal, los axentes de producción d'enerxía llétrico comuniquen al OS les previsiones d'esviamientos aniciaos en causes estremaes lo que, xunto coles variaciones na previsión de producción eólica que fai l'OS, y namás nel casu de que'l conxuntu de los esviamientos previstos nel periodu ente dos mercaos intradiarios perpasen los 300 MW en media horaria, da llugar a que l'OS convoque'l mercáu de xestión d'esviamientos. Esti mer-

cáu de xestión d'esviamientos consiste en pidir ufiertes a los xeneradores nel sen opuestu a les esviaciones previstes nel sistema.

Na península ibérica, lo más de la lletricidá xestiónase nel mercáu diariu (nel 2005, por exemplu, esta cantidá yera del 90%). Por ello centrarémonos sobre manera n'esplicar esti mercáu.

## 2.2 Funcionamientu del mercáu diariu

Pa esplicar el funcionamientu del Mercáu Llétricu vamos ver de mano cómo se faen les tresai-ciones de compra y venta d'enerxía. El mercáu diariu ye marxinalista, ye dicir, tolos xeneradores reciben un mesmu preciu, que ye'l que resulta al cruzar les curvas d'ufierta y demanda.

### 2.2.1 La Curva d'Ufierta

La ufierta d'un xenerador representa la cantidá d'enerxía que ta dispuestu a vender a partir d'un ciertu preciu mínimu. Asina, les ufiertes competitives d'un xenerador consten de dos partes:

- **Cantidá.** Ésta tien q'espayar les restricciones físiques a les que ta sujeta la so instalación (por exemplu, la potencia disponible, la potencia mínimo a lo qu'ha d'operar la central pa que la mesma seya estable y segura o mínimo téunicu, la disponibilidad de combustible o d'agua embalsao, la rapidez cola que puen incrementar la producción ente una hora y la viniente, etc.).

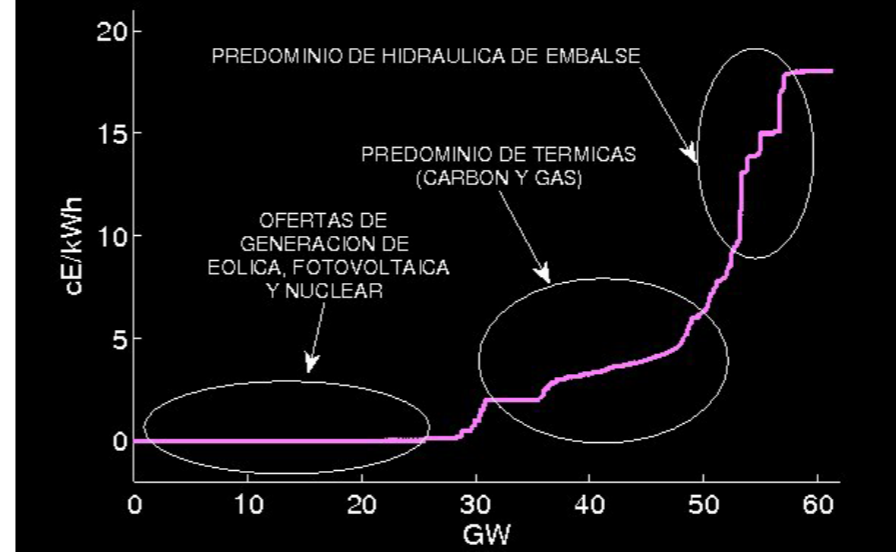
- **Preciu ufiertáu.** De mano, asemeyaría que'l preciu habría espayar los **costos de xeneración** de la teunoloxía implicada, de manera que per baxo d'esi preciu nun seya rentable xenerar (pol costu del combustible, por casu). Sicasí, el motivu verdaderu pa fixar los precios nes ufiertes ye'l **costu d'oportunidá**, conceutu más ampliu qu'engloba los costos de producción al igual qu'otros factores a tener en cuenta.

Por exemplu, supongamos que tenemos una central hidroeléctrica d'embalse. Si les reserves s'alcuentren al llímite de capacidá y ye conveniente evacuar agua rápido, la central fadrá ufiertes a preciu mui baxu de manera que s'asegure «entrar» na casación. Al contrario, si'l nivel de reserves ye mui baxu, entós fadrá ufiertes a preciu pereleváu p'asegurase que namás turbina agua empara d'una gran remuneración, de manera que pue permitise'l lluxu de nun producir mientres aguarda una futura situación de preciu de casación eleváu. Les centrales hidroeléctriques tán mui condicionaes pola meteoroloxía y la capacidá del banzáu, pero non pol costu del so «combustible» (l'agua, que lo reciben de baldre).

Per otra parte les centrales térmiques, pa tener en cuenta'l costu d'oportunidá, tendrán d'analizar la evolución del preciu del combustible (gas, carbón, etc.), la capacidá d'estoc, lo mesmo que'l costu d'arranque y parada que conlleva una gran turbina.

Sicasí, nel casu de los parques eólicos, de mano tien más difícil tener en cuenta'l costu d'oportunidá, darréu que si tien ocasión de xenerar nuna situación de vientu favorable, nun lo facer nun aumenta la posibilidá de llograr mayores beneficios nel futuru, porque nin aforra en combustible nin pue almacenalo pa una ocasión posterior. Por ello les sos ufiertes suelen ser a un preciu cero p'asegurar la casación. Esta estratexa d'ufierta ye tamién habitual en plantes fotovoltaiques y la hidráulica fluyente (ensin banzáu) polos mesmos motivos.

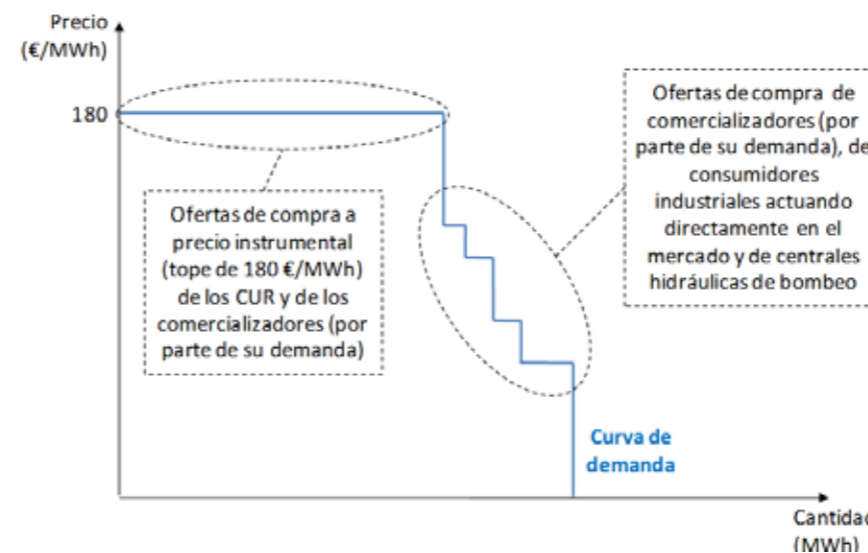
Les centrales nucleares tamién ufierten a preciu cero, pero por causes diferentes. Les centrales nucleares, pola teunoloxía involucrada, tienen poca capacidá de variar el nivel de producción nel tiempu. Ye polo que se consi-



dera una potencia constante y lo deseable ye que funcionen a potencia nominal. Polo tanto, les ufiertes a preciu cero busquen asegurar la casación pa caltener un nivel de producción constante.

Queda entós aclarao que'l preciu d'ufierta que faen les unidaes xeneradores nel mercáu diariu nun tien que ver meramente col costu de la teunoloxía en sí, sinón tamién col costu d'oportunidá pa elaborar una estratexa de máximos beneficios nun contestu de llibre mercáu.

En presentando los vendedores les sos ufiertes al mercáu pa caúna de les hores del día viniente, l'OMEL amiéstales y ordénales por preciu ascendente, resultando asina la curva d'ufierta del mercáu pa cada hora (ver figura 2). Esta curva reflexa de forma más o menos clara tramos o pasos que correspuenden a ufiertes de centrales de la mesma teunoloxía.



### 2.2.2 La Curva de Demanda

Al empar, los consumidores, direutamente –nel casu de ser consumidores cualificaos, actualmente namás dalgunos grandes empreses– o indireutamente, per mediu de les empreses comercializadores o distribuidores, faen ufiertes de compra.

La participación de los estremaos tipos de consumidores nel mercaáu depende de la modalidá de sumistru a la que tean acoyíos: «Sumistru d'Últimu Recursu» o «mercáu lliberalizáu».

- Cola modalidá de Sumistru d'Últimu Recursu (SUR), que namás ye accesible a potencies contrataes iguales o menores de 10 kW, los consumidores participen indireutamente nel mercáu. Fáenlo per aciu del **Comercializador d'Últimu Recursu (CUR)** qu'escoyeren. Esti ye l'axente encargáu d'estimar la demanda de los sos consumidores y, consecuentemente, facer nel mercáu les ufiertes de compra d'enerxía que se precisen.

- Sicasí, los más de los consumidores participen indireutamente nel «mercáu lliberalizáu» per mediu del so **comercializador**. Esti ofrez unos precios (fixos o semifixos) que s'afaen a les preferencies de cada consumidor.

Al igual que nel casu de la curva d'ufierta, la curva de demanda tamién tien tramos nos que s'agrupen indireutamente determinaos tipos de consumidores, como amuesa la **figura 3**.

ARRIBA

Figura 2. Curva d'ufierta.

Fonte: [www.observaemercadoelectrico.net](http://www.observaemercadoelectrico.net) [Fonte en castellanu].

IZQUIERDA

Figura 3. Curva de demanda.

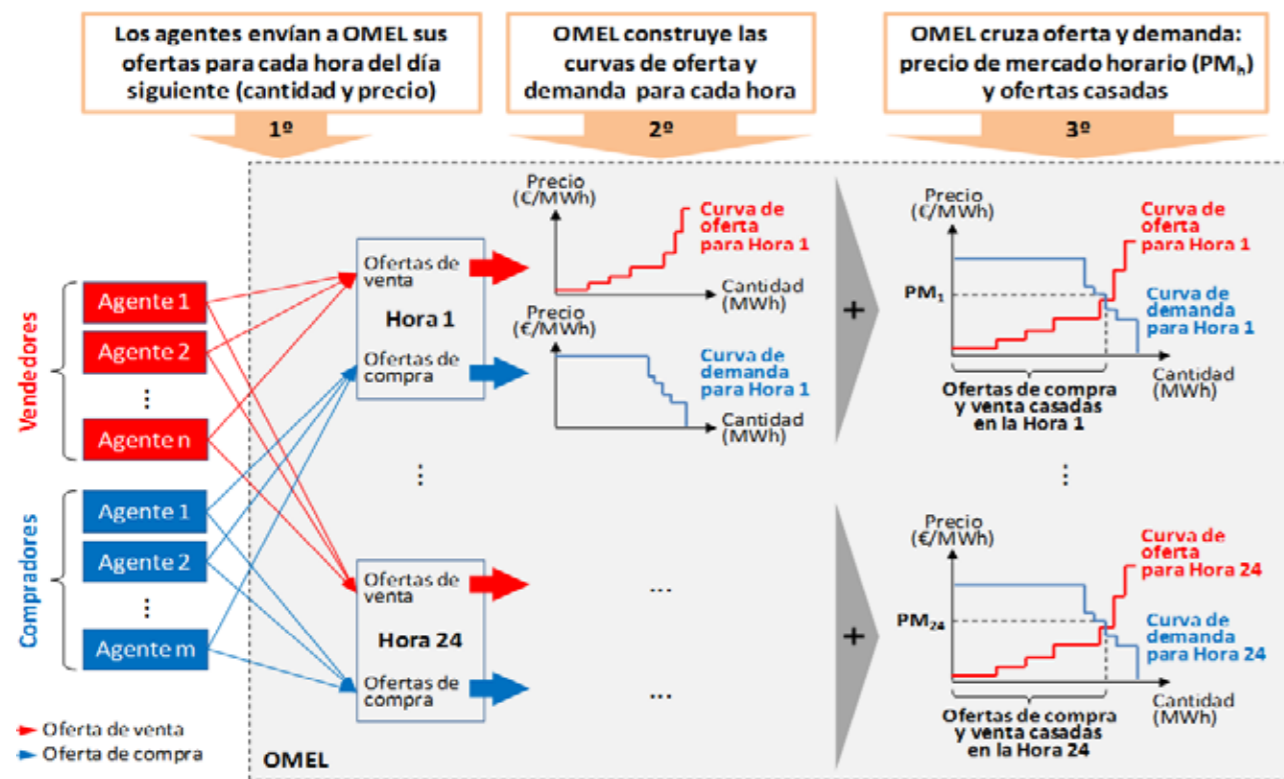
Fonte: <http://www.energiaysociedad.es> [Fonte en castellanu].

- Los «comercializadores d'últimu recursu» y muchos «comercializadores» suelen ufiertar al máximu preciu permitíu, llamáu preciu instrumental (180 €/MWh). La razón ye asegurar que los consumidores tendrán asegurada la enerxía que demanden. Esto nun quier dicir que vayan pagar dichu preciu sinón que pagarán el que resulte de la casación nel mercáu.

- Per otra parte muchos consumidores namás tán dispuestos a comprar enerxía si'l preciu ye menor a un ciertu valor. Estos consumidores son los que tienen la posibilidá d'adautar el so consumu a los precios del mercáu (p.ex., dalgunos consumidores industriales o xeneradores hidráulicos de bombéu consumen lletricidá preferentemente nos periodos de precios baxos). Estos consumidores son los qu'apaecen na curva de demanda con una cierta pendiente.

ABAXO

Figura 4. Curves amestaes d'ufierta y demanda.  
Fonte: <http://www.energiaysociedad.es>  
(Fonte en castellanu).



2.2.3 El preciu

Sumando les ufiertes de compra íguase una curva amestada llamada curva de demanda. Per otu llau, sumando les ufiertes de venta íguase una curva amestada denominada curva d'ufierta. Obsérvase na figura 4 cómo la interseición d'entrambes curves en cada hora, determina la enerxía total casao y el preciu marxinal.

2.2.4 Influencia de les renovables nel mercáu diariu

Vamos ver cómo inflúin les enerxías renovables nel mercáu lléctricu pa estudiar el comportamientu de los parques eólicos nel mesmu. De mano ye importante decatase de la prioridá qu'impón el mercáu, a ciertos fontes. Les enerxías nucleares y renovables, que nun se puen desperdiciar nin aparar, cubren, en primer llugar, la demanda estimada. Primero acceden les nucleares, porque al tener una gran inercia térmica los parones y arranques nun seríen viables por costosos.

DERECHA

FIGURA 5. Influencia de les renovables.  
Fonte: AEE  
(Fonte en castellanu).



Darréu, les enerxías renovables por normativa llegal que promueve'l so desendolcu. Esta prioridá fuerca que la enerxía disponible per aciu d'esos teunoloxíes s'ufierte a cero euros. Dempués, entren les demás enerxías. La última en vender pa cubrir la demanda proyeutada, al preciu más caru, marca'l preciu marxinal, ye dicir, la tarifa de toes.

Polo tanto, les enerxías renovables, magar que tienen aseguráu un preciu reguláu o una prima tamién tán obligaes a pasar pel mercáu, y como entren a preciu cero nel mercáu de la lletricidá, desplacen a unidaes de xeneración convencional de costu marxinal eleváu, que fixaríen precios marginales más altos. D'esti mou, la presencia de les renovables produz un abaratamientu del preciu final del mercáu (ver figura 5).

El fechu d'ufiertar a preciu cero pue dar llugar a situaciones tan paradóxiqes, como que nos casos nos que la demanda d'enerxía lléctricu seya igual o inferior a la ufierta d'enerxía de centrales con ufierta de cero euros, l'efeutu será que toa esa enerxía casao tendrá un preciu nulu.

Esta situación prodúxose, por exemplu, a lo llargo de 74 hores, ente los díes 28 d'avientu del 2009 y el 15 de xineru del 2010. A primeros de marzu de 2010, produxérense otres 58 hores ensin preciu. Un añu dempués diéronse de nuevo les condiciones suficientes pa que nes hores

valle del ciclu de demanda d'enerxía lléctricu, la casación d'ufierta y demanda se produxere a 0€/MWh. Les hores 3ª a la 7ª la casación foi nula, produciéndose precios anormales tamién nes hores 2ª, 8ª y 9ª onde los precios foron de: 4 €/MWh; 4,01 €/MWh y 5,01 €/MWh.

L'impautu económicu d'esta situación ente los diferentes axentes productores ye diferente, siendo perbeneficiosu pal bombéu al que-y costó la enerxía cero euros y pa les enerxías del réxime especial que tienen un preciu mínimu garantizáu.

Fai falta un análisis fondu porque nel casu de nun se tomar midíes de nengún tipu (en rellación cola curva de carga del sistema nes hores valle) y siguiere aumentándose la capacidá eólica, de la manera que ta prevista, nun amenorgare la xeneración de base nuclear y nun aumentare la capacidá de bombiar y esportar enerxía lléctricu, el sistema lléctricu presentará más irregularidaes.

Les midíes enerxétiques (como la que presentamos nesti trabayu) que tengan en cuenta les circunstancies anteriores, potenciando'l bombéu, serán perinteresantes pal mercáu.

### 2.3 El réxime especial

La Llei 54/1997, del Sector Llétricu, establez los principios d'un modelu de funcionamientu que ta basáu na llibre competencia y nel que se crucen ufiertes y demandes de lletricidá, determinando asina'l preciu de la enerxía como vimos anteriormente. Ensin embargo, dicha Llei fai compatible esti principiu cola consecución d'otros oxetivos, como la meyora de la eficiencia enerxética, la mengua del consumu y la proteición del mediu ambiente.

Con esti fin establezse la existencia d'un Réxime Especial de producción como complementu al Réxime Ordinariu. Establezse d'esti mou una estremancia clara ente dos tipos de xeneración llétrica: el réxime ordinariu y el réxime especial. El réxime ordinariu fórmenlu toes aquelles centrales con potencia instalao que seya igual o superior a 50 MW y el réxime especial ta formáu, ensin entrar en particularidaes, por aquelles unidaes de producción con potencia instalao menor de 50 MW qu'utilicen la coxeneración, enerxías renovables, biomasa, cualquier clas de biocarburantes y residuos non renovables. El réxime especial gocia d'un réxime económicu y xurídicu beneficiosu en comparanza col réxime ordinariu que comprende a les teunoloxías convencionales.

Les teunoloxías que componen el réxime ordinariu son el carbón, el fuel, les centrales nucleares, los ciclos combinaos de gas y les grandes centrales hidroeléctriques con más de 50 MW. Nel réxime especial asítiense toles demás teunoloxías, incluyies les centrales hidroeléctriques con potencies instalaes menores de 50 MW.

Constitúi un error común identificar les enerxías renovables col réxime especial: nin toles renovables tán nel réxime especial, nin el réxime especial ye dafechamente renovable.

Los productores de réxime especial, pa avender, total o parcialmente, la so producción d'enerxía llétrica, tendrán d'escoyer una de les opciones vinientes:

- Tarifa regulada: cobrar una tarifa fixa por kWh xeneráu.
- Mercáu de producción: cobrar el precio del mercáu (*pool*) más una prima.

### 2.4 Penalizaciones por esviamientu

Cuando un productor nun pue suministrar la enerxía qu'ufiertó anteriormente, otros productores han d'amenorgar o incrementar la producción y pa evitar, dientro de lo posible, esti efeutu negativu, les compañíes llétriques tienen de pagar penalizaciones por esviamientu.

El costu del esviamientu cargarase al axente de mercáu responsable del mesmu, siguiendo les pautes determinaes por RD 661/2007, y supón una perda d'ingresos en cualquier escenariu de precios, primes o tarifas, y esto inclúi a les enerxías renovables, incluyíos los parques eólicos. Estes penalizaciones son les qu'intentamos evitar o pelo menos minimizar per mediu del estudiu que presentamos más alantre.

**Nin toles renovables tán nel réxime especial de producción qu'establez la llexislación nin esi réxime especial ye renovable dafechu**

## 3. LA ENERXÍA EÓLICO

### 3.1 Teunoloxía

Los aeroxeneradores son dispositivos que convierten la enerxía cinético del vientu n'enerxía mecánico. La captación de la enerxía eólico prodúzse per mediu de l'aición del vientu sobro les pales.

Hai munches clasificaciones pa los aeroxeneradores, pero ensin entrar en detalle diremos qu'actualmente, los más eficientes y que polo tanto s'impunxeron sobro'l restu son los aeroxeneradores d'exa horizontal (paralela al suelu) y provistos de 3 pales. Esta abulta ser la meyor opción en cuantes a optimización de la potencia obtenío, durabilidad de la instalación, y que meyor s'afayen a los vientos habituales.

Nesta triba d'aeroxeneradores la producción llétrica ye nula pa velocidaes baxes de vientu, hasta una velocidá llende denominada «cut-in» o velocidá de conexón, abondo pa vencer el rozamientu inicial y poner en marcha el xenerador (esta velocidá ta comprendío xeneralmente entre 3-5 m/s).

A partir d'ehí, la producción de potencia aumenta rápidamente col vientu, hasta la llamada potencia nominal del aeroxenerador. Dende esi puntu, el xenerador maniobra pa caltenese produciendo la máxima potencia énte mayores velocidaes del vientu, hasta qu'esti llega a un valor determináu «cut-out» o velocidá de corte, onde les turbinas tienen que parar por razones de seguranza, darréu que a talos vientos la estructura ta soportando una gran carga aerodinámica (esta velocidá considérase xeneralmente a partir de 25 m/s).

El rápidu aumentu de la potencia eólico a partir de la velocidá «cut-in» ye pola mor que la potencia disponible nel vientu pa ser estrayío, aumenta según el cubu de la velocidá, acordies cola fórmula que vien darréu:

$$P = \frac{1}{2} \rho A r v^3$$

onde  $\rho$  ye la densidá de aire,  $A r$  ye la superficie del rotor y  $v$  la velocidá.

Polo tanto yá vemos qu'ún de los problemas que tienen los parques eólicos, pa poder predicir la enerxía xenerao pal día viniente, pa puyar nel mercáu diariu, ye que pequeñes variaciones na predicción del vientu, causen grandes esviamientos na potencia.

### 3.2 Situación de la enerxía eólico n'España

Acordies colos datos d'AEE (Asociación Empresarial Eólica), los datos básicos de lo eólico n'España son los vinientes:

- Nel añu 2011, cubrió'l 15,75% de la demanda llétrica del país.
- España ye'l cuartu país del mundu por potencia eólico instalao, tres Estaos Xuníos, Alemaña y China.
- La potencia instalao a lo cabero de 2011 yera de 21.673 MW.
- La eólica foi la tercer teunoloxía nel sistema llétricu en 2010, per detrás del gas y la nuclear, con una producción de 43.692 GWh, pero foi la primera en marzu de 2011.

Comunida Autónoma	Potencia instalada en 2011 (MW)	Potencia acumulada a dierre de 2011 (MW)	Tasa de variación
Castilla y León	462,19	5.233,01	9,70%
Castilla La Mancha	26,50	3.736,79	0,70%
Galicia	0	3.272,17	0%
Andalucía	92	3.066,93	3,10%
Aragón	50	1.811,31	2,80%
Com. Valenciana	183	1.169,99	18,50%
Cataluña	153,71	1.003,35	18,10%
Navarra	8,50	976,92	0,90%
La Rioja	0	446,62	0%
Asturias	72,50	428,45	20,40%
Murcia	0	189,96	0%
País Vasco	0	153,25	0%
Canarias	1,70	145,78	1,20%
Cantabria	0	35,30	0%
Baleares	0	3,68	0%
<b>TOTAL</b>	<b>1.050</b>	<b>21.673</b>	<b>5,10%</b>

**IZQUIERDA**

Figura 6. Repartu de la potencia instalao por Comunidaes Autónomes en 2011.

Fonte: AEE

**DERECHA**

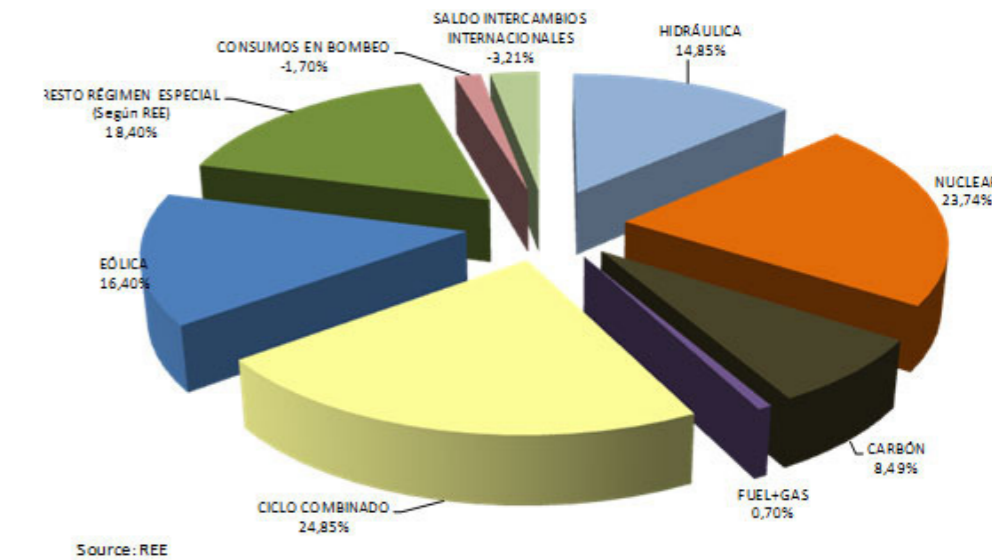
Figura 7. Cobertura de la demanda d'enerxía lléctricu.

Fonte: AEE

**ABAXO**

Figura 8. Parques eólicos n'Asturies.

Fonte: Asturias.es



**3.3 Situación de la enerxía eólico n'Asturies**

Acordies colo qu'espubliza'l Gobiernu del Principáu, na so páxina web, Asturias tien 13 parques eólicos instalaos, con 355,95 megavattios y 387 aerogeneradores. Na tabla viniente podemos ver la so distribución.

Nel mapa podemos ver l'estáu a 19-01-2011. A los 13 parques en funcionamientu, amiestense dos n'obres: Carondio y Muriellos (50 MW, Allande y Villayón), y Peña del Cuervo (18 MW, Les Regueres). El mapa reflexa amás otros 15 parques en proyeutu.

	NOME	ALLUGAMIENU	P (MW)	Nº A.
1	Pico Gallo	Picu'l Gayu - L'Altu Bustel.lán (Tinéu)	24,42	37
2	La Bobia San Isidro	A Serra da Bovia (Vilanova d'Ozcós y Eilao)	49,30	58
3	Chao das Grallas	Chao das Grallas (Vilanova d'Ozcós)	28,00	14
4	Sierra de los Lagos	A Serra dos Llagos (Allande)	38,94	59
5	Sierra de la Cuesta	A Serra d'A Costa (Grandas de Salime)	7,92	12
6	Sierra del Acebo	A Serra del Acebo (Grandas de Salime)	17,82	27
7	Sierra de Bodenaya	La Sierra Boudenaya (Salas)	18,00	12
8	Penouta	Alto de Penouta (Bual)	5,95	7
9	Belmonte	La Sierra de Bixega (Miranda)	34,85	41
10	Curiscao	La Sierra de Curiscau (Salas)	45,90	54
11	Baos y Pumar	La Sierra de Los Vaos y Pumar (Salas y Cuideiru)	34,85	41
12	Sierra de Tineo	La Sierra de Tinéu (Tinéu)	44,00	22
13	Alto de Abara	Alto d'Abara (El Franco y Cuaña)	6,00	3
Tot.			355,95	387

Parques Eólicos en Funcionamientu n'Asturies a 28 d'ochobre de 2009. Fonte: Asturias.es



EN FUNCIONAMIENTO (13)	EN OBRAS (2)	ACTUALMENTE EN PROYECTO (15)
PE-1 PICO GALLO	PE-26 CARONDIO Y MURIELLOS	PE-13 ESCORPIO
PE-2 LA BOBIA-SAN ISIDRO	PE-68 PEÑA DEL CUERVO	PE-24 PANONDIRES
PE-3 CHAO DAS GRALLAS		PE-25 EL CANDAL
PE-5 SIERRA DE LOS LAGOS		PE-29 EL SEGREDAL
PE-6 SIERRA DE LA CUESTA		PE-34 EL CORDEL Y VIDURAL
PE-7 SIERRA DEL ACEBO		
PE-8 SIERRA DE BODENAYA		
PE-27 SIERRA DE CURISCAO		
PE-28 SIERRA DE BAOS Y PUMAR		
PE-30 PENOUTA		
PE-33 SIERRA DE TINEO		
PE-39 BELMONTE		
PE-49 ALTO DE ABARA		
		PE-41 BOBIA-LAS CRUCES
		PE-43 SAN ROQUE
		PE-45 CAPIECHAMARTÍN
		PE-46 BUSECO
		PE-53 PALANCAS
		PE-54 BUSSEIRÓN
		PE-55 SANTISO
		PE-56 ABLANIEGO
		PE-57 A XUNQUEIRA
		PE-58 A CADIGA

Según noticia asoleyada en *La Nueva España* (13-09-2009), el Gobiernu asturianu axudicó la instalación de 40 nuevos parques eólicos nel occidente del país, que xunto a los que yá hai supondrá la instalación n'Asturies d'un total de 72 centrales de molinos de vientu, con una potencia conxuntu de 1.576,85 MW.

La moratoria de siete años que'l Principáu llevó en xunu de 2008 provocó un refileru de solicitúes. Tres l'axudicación definitiva, entamaráse los trámites llegalos pa la construcción d'estes centrales, incluyíos los medioambientales, lo que fai prever que nun entamen a funcionar hasta l'año 2015. El Principáu recibió ente'l 4 de xunu de 2008, cuando se llevó la moratoria a la construcción de parques eólicos, y el 13 de xunetu de 2009 un total de 127 solicitúes pa construyir aerogeneradores.

### 3.4 Centrales de bombéu n'Asturies

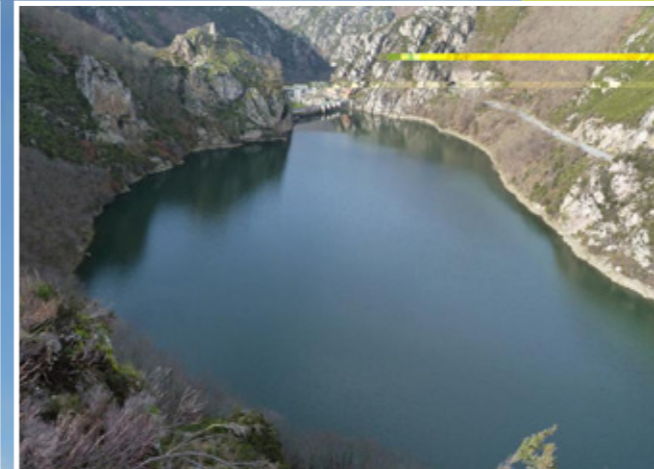
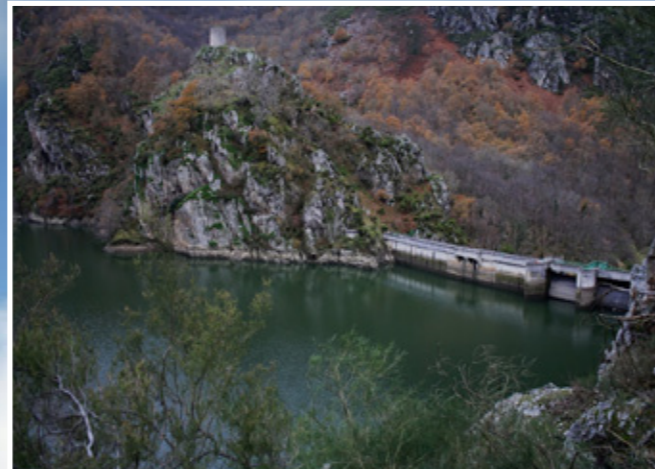
Una central de bombéu ye simplemente una central hidroléctrica que funciona bidireccionalmente, ye dicir, ye a tresformar enerxía potencial n'enerxía llétrica y viceversa. Estes centrales inxértense nel sistema d'«Almacenamientu enerxéticu en rede» ayudando a adautar la xeneración a la curva de la demanda colo que s'amenorguen les variaciones d'energía que tienen que facer les teunoloxíes menos acionaes pa ello. D'esti mou les centrales reversibles bombiarían nes hores valle, y turbinaríen nes hores picu y asina pue utilizase como una especie de batería xigante.

Nes hores valle, que son les de menor demanda enerxética, y en consecuencia pue dicise que la enerxía llétrica ye más barato, tales bombes tarán bombiando agua al depóscitu cimero.

Nes hores picu, que contraponiéndose a les valle, son nes que la demanda ye mayor y en consecuencia'l costu enerxéticu mayor, les bombes apagaránse, que son les que consumen enerxía llétrica pa tresformalo en potencial y les turbinas prenderánse pa xenerar enerxía llétrica a partir de lo potencial.

Les centrales hidroléctriques reversibles, tienen, lóxicamente, un menor rendimientu cuando tán funcionando como bombes que cuando tán funcionando como turbinas.

N'Asturies hai una central de bombéu. Ye la central de Tañes–Rusecu, propiedá d'HC Enerxía. Ta asitiada nel ríu Nalón, nos conceyos de Casu y Sobrescobiu y consta de dos banzaos: el cimero de Tañes y el baxeru de Rusecu. La puesta en funcionamientu foi nel añu 1978.



#### IZQUIERDA

Figura 9. Picu'l Gayu, Tinéu.

Fonte: <http://flickr.com/potos/eugeniofernandezcorral>

#### CENTRO/DERECHA

Figura 10. Centrales de Rusecu y Tañes.

Fontes:

<http://foros.embalses.net/showthread.php/10846-Embalse-de-Tanes>  
<http://foros.embalses.net/showthread.php/10846-Embalse-de-Rioseco>

- Salto netu mediu: 102 metros en xeneración, 105 metros en bombéu.
- Volume útil del banzáu (Hm3): 25,3 en Tañes; 2,82 en Rusecu.

## 4. CENTRALES HIDROEÓLIQUES

Pa comprender lo que nós proponemos p'Asturies entamemos analizando'l referente a nivel mundial sobro les centrales hidroeléctriques: el proyeutu de la islla d'El Hierro.

### 4.1 La instalación de la islla d'El Hierro

La islla canaria d'El Hierro, ye Reserva Mundial de la Biosfera dende l'año 2001 y surde del agua del Atlánticu algamando les sos lladeres arispies los 1.500 metros d'altor, lo que da llugar a una orografía singular permanentemente zurdida pol aire. Tien una superficie de 278 quilómetros cuadros y una población de 10.668 habitantes.

El proyeutu *100% Energías Renovables para El Hierro* contempla la construcción d'una central hidroeléctrica quien a cubrir tola demanda llétrica de la islla, convirtiéndose ésta na primer comunidá del mundu n'autoabastecese única y exclusivamente con enerxía renovable.

Los datos téunicos principales son los que vienen darréu:

- Potencia instalao (MW): 123 en xeneración; 114,5 en bombéu.
- Enerxía producible n'año mediu: 85.000 MWh y 115 en bombéu.
- Caudal máximu d'equipamientu: 119,5 m3/s en xeneración; 115 m3/s en bombéu.



La central dispondrá de dos depósitos d'agua y contará con un parque eólicu de 5 aerogeneradores, una central de bombeo y una central de motores diesel (yá existente) qu'entraría en funcionamiento en casos esceicionales d'emergencia nos que nun hubiera nin agua nin aire abondos pa cubrir la demanda.

El proyeutu nun ye una utopía. Nes semeyes de la figura 11 pue apreciase l'estáu avanzáu de les obres, tanto nos depósitos como nel parque eólicu. De fechu, les primeres pieces de los aerogeneradores de la Central Hidroeléctrica d'El Hierro yá tán montándose en Los Dares, Valverde a lo cabero de xineru de 2012.

#### 4.2 Estudiu d'una central hidroeléctrica

La central hidroeléctrica d'El Hierro nun va entrar nel mercáu lléctricu, porque la so misión ye autoabastecer la isla, ensin embargu si se construyere una central d'esta triba n'Asturies o n'otru puntu de la península lo normal sedría que tuviera qu'ufiertar la so enerxía nel mercáu lléctricu y esi ye l'oxetu del nuesu estudiu, pa facelo de la manera más eficiente posible.

Los nuevos marcos regulatorios llograron asitiar a España como'l segundu país en tol mundu con mayor capacidá d'enerxía eólico. El nuevu Reglamentu (RD661/2007) permite a los parques eólicos acudir al mercáu a vender la enerxía xenerao poles sos instalaciones, en consecuencia, tendrá de preparar les sos ufiertes, la programación de la producción d'enerxía y la posterior venta al mercáu.

Sicasí, la enerxía eólico tien un refileru de carauterístiques que lo faen especial, y la más importante ye'l problema de la imprevisibilidá de la producción de los parques eólicos. Magar qu'hai

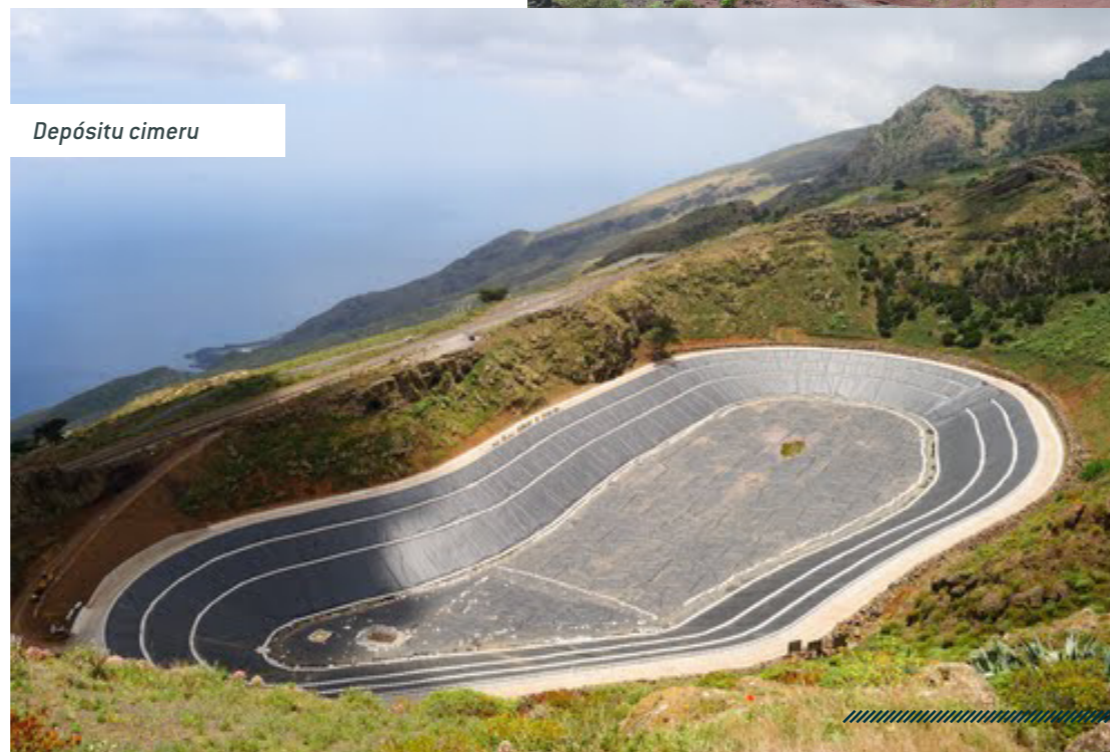
DERECHA

Figura 11. Construcción de la central hidroeléctrica d'El Hierro.

Fonte: <http://www.panoramio.com/photo/63130865>



Depósito baxeru



Depósito cimero



Parque eólicu

dellos modelos de predicción comerciales (Apollo y Casandra, por exemplu), la principal torga pa la predicción de la enerxía eólico ye que la potencia xenerao ye proporcional al cubu de la velocidá del aire. Eso quier dicir que pequeñes variaciones na velocidá producen grandes esviamientos na potencia producío. En casu d'escasu o escasez, los productores d'otres compañíes tienen de menguar o aumentar la producción pa iguar l'esviamientu, polo qu'incurrirán en perdes financieras. Esta perda financiera conocida como *penalizaciones por esviamientu* ta recoyida tamién nel RD661/2007.

Na actualidá, el costu de talos esviamientos nun se paga hasta pasaos dos años aproximadamente, pues depende de les midiciones de los contadores per parte del operador del sistema. Polo tanto, la práutica habitual ye que les penalizaciones por esviamientu s'afiten, en xeneral, nun 25-30% del preciu d'equilibriu del mercáu spot.

Otru puntu importante a tener en cuenta ye'l fechu de que les enerxíes renovables reciben distintos tipos de subvenciones del Gobiernu. Estes primes tamién tán recoyíes nel RD661/2007. Dao que tanto les instalaciones d'enerxía eólico como les centrales hidroeléctriques de menos 50 MW tán inxeríes nel presente Reglamentu, nun sedrá precisu considerar les primes nel nuesu estudiu.

Énte esta situación, los parques eólicos tienen delles opciones: puen acudir al mercáu intradiariu pa compensar d'esti mou los errores de predicción; puen pagar les sanciones asociaes o puen tratar d'almacenar

la enerxía eólico escedente, de dalguna manera. Propunxéronse diversos métodos p'almacenar esta enerxía: almacenamientu d'aire comprimío, bateríes pa coches llétricos, volantes, sistemas d'almacenamientu de calor, imanes superconductores, hidróxenu, y el que s'analiza nesti trabayu: l'agua bombiao.

Vamos plantear dos estudios en rrellación a les centrales hidroeléctriques

#### 4.2.1 Vender al mercáu

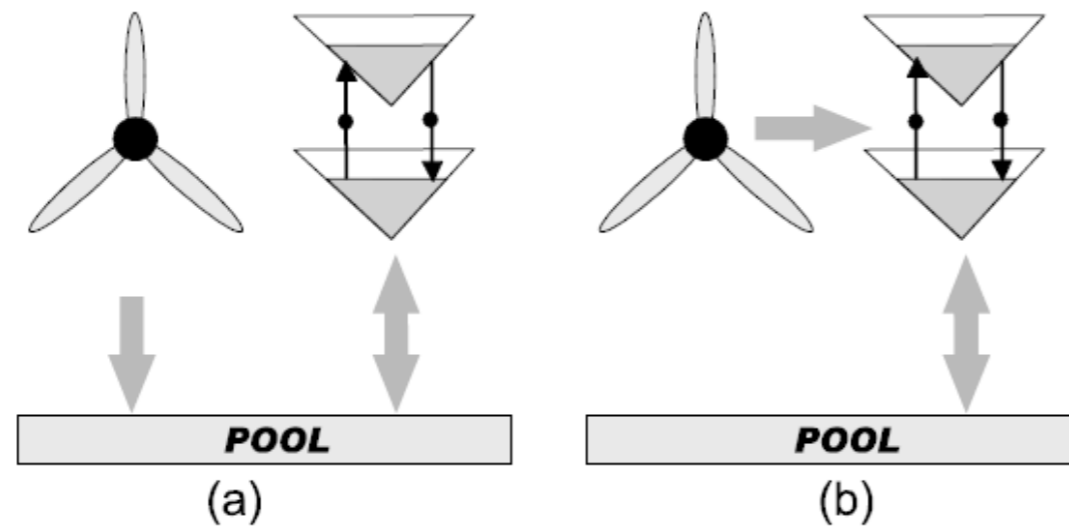
Nesti primer estudiu consideraremos la optimización conxunta d'una central de bombéu y un parque eólico y analizaremos qué estratexa ye la meyor posible. Consideraremos dos configuraciones estremes (ver Figura 12):

ABAXO

Figura 12. Dos configuraciones. [Fonte n'inglés].

ARRIBA DERECHA

Figura 13. Dos escenarios. [Fonte n'inglés].



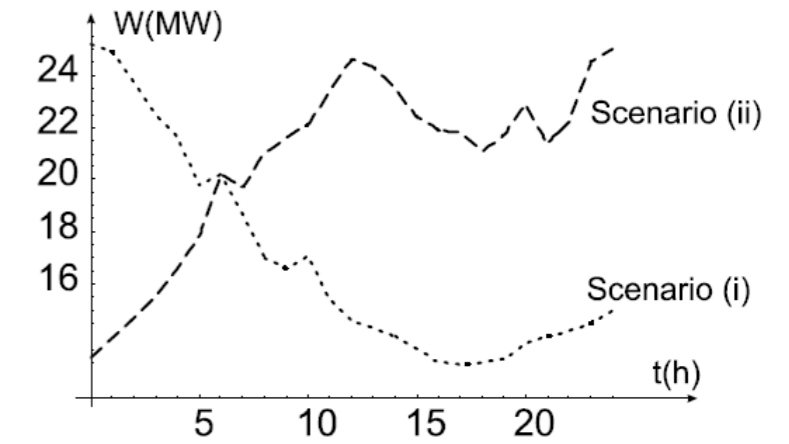
(a) El parque eólico y la central de bombéu trabayen de manera independiente, y caúna viende la enerxía que produz nel mercáu por separao.

(b) El parque d'enerxía eólico nun viende nel mercáu, sinón qu'utiliza la enerxía xenerao pa bombiar agua al banzáu cimero de la central de bombéu. Pa esta configuración, la central de bombéu tien que ser a bombiar y turbinar de forma simultánea. Esti problema íguase fácilmente duplicando'l númberu de tomes d'agua, y creando un conxuntu de conducciones independientes con turbinas reversibles y bombes.

Ye evidente qu'hai múltiples factores qu'inflúin nel resultáu final, como por exemplu: la eficiencia de la planta hidroeléctrica, el volume d'agua disponible, les penalizaciones por esviamientu o la producción d'enerxía eólico. Vamos considerar dos escenarios (ver Figura 13): (i) Producción eólica baxa n'hores picu y (ii) Producción eólica alta n'hores picu y llueu procederemos a analizar la influencia de les penalizaciones por esviamientu.

Col envís de nun enguedeyar sobre manera l'estudiu, vamos suponer que los esviamientos,  $d$ , son un ciertu % de la enerxía eólico producío nel intervalu de optimización. Vamos analizar dellos casos, dende esviamientos baxos (30% en permediu) a esviamientos altos (70% en permediu).

El beneficiu hidráulicu na configuración (a) ye siempre'l mesmu, mentantu que'l beneficiu de la enerxía eólico mengua progresivamente col aumentu de los esviamientos. Nun hai beneficiu de la enerxía eólico na configuración



(b), l'únicu beneficiu ye l'hidráulicu, qu'aumenta bultablemente pues el volume d'agua disponible tamién aumenta.

La primer tabla amuesa los resultaos algaos nel escenariu (i). Comparando entrambes configuraciones nesti escenariu (i), de baxa producción d'enerxía eólico n'hores punta, vemos que'l beneficiu total en (b) ye superior al obteníu en (a) namás pa los esviamientos superiores al 50%. Namás nestos casos la opción (b) sería la más interesante.

Config. (a)	$d$	Wind Profit	Hid. Profit	Tot. Profit
	30%	30662.9	26518.8	57181.7
	50%	28824.8	"	55343.6
	70%	26986.7	"	53505.5
Config. (b)		$b^*(10^6 m^3)$	Hid. Profit	Tot. Profit
		2.64416	55202.8	55202.8

Comparanza de beneficios n'escenariu (i). [Fonte n'inglés].

Config. (a)	$d$	Wind Profit	Hid. Profit	Tot. Profit
	30%	39706.7	26518.8	66225.6
	50%	37326.5	"	63845.3
	70%	34946.3	"	61465.1
Config. (b)		$b^*(10^6 m^3)$	Hid. Profit	Tot. Profit
		3.27168	61516.7	61516.7

Comparanza de beneficios n'escenariu (ii). [Fonte n'inglés].

La segunda tabla amuesa los resultaos algamaos nel escenariu (ii). Como pue vese, el beneficiu total (b) nesti escenariu d'alta producción d'enerxía eólico n'hores punta nun perpassa'l valor obteníu en (a) en prácticamente nenguna situación de los posibles esviamientos. La razón ye que'l preciu de mercáu ye peraltu nes hores picu y paga la pena vender la enerxía eólico a pesar d'incurrir en penalizaciones por esviamientu.

En conclusión, la configuración (b) nun paez mui conveniente en xeneral. Namás cuando la planta hidráulica tien mui poca agua disponible sería una opción interesante. El fechu de que más del 90% de les plantes d'enerxía eólico del sistema español acudan al mercáu a vender la enerxía que producen ye, agora, un dato comprensible. Sicasí, como vimos, el sistema ye mui sensible a munchos factores y cada empresa tien d'evaluar cuidadosamente les situaciones particulares que puen dar llugar a variaciones na configuración óptima. El nuesu estudiu proporciona una ferramienta amañosu, cenciella y mui eficiente pa la toma de tal determin.

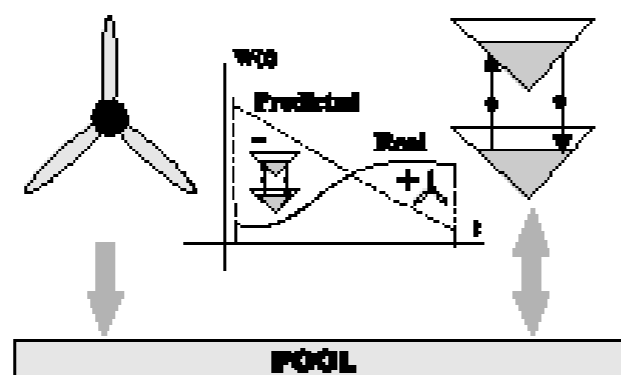
#### 4.2.2. Funcionamientu óptimu d'una central hidroeléctrica.

Tres l'estudiu anterior, y n'asumiendo qu'entrambes centrales acudirán al mercáu coles ufiertes correspondientes, llega'l momentu de tratar el problema viniente: ¿Cómo modelizar el funcionamientu combináu de la que se llama central hidroeléctrica?

Trátase, en primer llugar, d'emplegar los escedentes eólicos pa bombiar agua, evitando asina les penalizaciones por escesu (errores positivos) y, en segundu llugar, d'utilizar la central hidráulica turbinando agua pa compensar les esviaciones por defectu (errores negativos). Ye

la configuración (c) que s'amuesa na **Figura 14**.

La primer cuestión nun tien nengún problema: los escesos de producción eólica sobre lo ufiertao desanicaránse nel intre. Pero la segunda cuestión nun ye tan trivial. Nun hai qu'escaecer que la central de bombéu yá fixo la so ufierta al mercáu estimando'l gastu d'agua pal otru día.



ARRIBA

Figura 14. Configuración (c).  
(Fonte n'inglés).

Si al otru día, por exemplu, la producción eólica ye mucho inferior a la ufiertada y, poro, precisamos muncha agua pa compensar el defectu de producción eólica: ¿d'aú sal esa agua? Si esa agua lo tuviéramos, seguramente ufiertaríamoslo al mercáu.

La solución que proponemos ye crear una «reserva ficticia» dientro'l banzáu pa cubrir estes continxencies. Esta reserva crearíase coles aportaciones de lo eólico nos errores positivos y d'ello gastaríase agua nos errores negativos. Lóxicamente, si los errores negativos son superiores a los positivos, esa reserva escosará en munches ocasiones.

Y esti ye un problema al que l'operador de la central tien de poner muncha atención, iguando les sos predicciones en casu d'observar esta ten-

dencia. D'esti mou la información del mediu plazu (selmanes) influiría nel curtiu plazu (un día).

Como vemos ye un problema que tien que s'analizar con procuru considerando con detalle los múltiples factores qu'inflúin. Y ente ellos nun nos escaecer de la modelización acionada de la central de bombéu: capacidá del depósitu inferior, capacidá de bombéu, etc.

## 5. CONCLUSIONES

El nuesu estudiu amosó los beneficios de la optimización conxunta y destacó los parámetros cimeros del modelu a la hora de diseñar una central hidroeléctrica.

Dende'l puntu de vista económicu y de funcionamientu del mercáu llétricu, hai razones poderoses pal diseñu de centrales hidroeléctriques

como la propuesta nesti trabayu.

- Per un llau, l'altu grau d'implantación de los parques eólicos ta entamando a causar graves problemes na regulación de la rede llétrica pola mor de la imprevisibilidá de los parques eólicos convencionales. Prevése un incrementu nos requisitos qu'ha cumplir la xeneración eólica qu'obligue a los parques a adautase téunicamente pa colaborar na regulación. Un parque eólicu dotáu d'un sistema acumulador d'enerxía como'l propuestu podría adautase abondo meyor a estos cambeos.

- Per otra parte, la regulación del mercáu llétricu ta cambiando continuamente. La meyor manera de protexese frente a estos cambeos normativos ye disponer del sistema más eficiente y flexible posible, que permita funcionar acionadamente en cualquier contestu de mercáu.

## Referencies

<http://www.omie.es/inicio>

<http://www.energiaysociedad.es>

<http://www.observaelmercadoelectrico.net>

<http://www.redeléctrica.es>

<http://www.lne.es/economia/2009/09/13/40-parques-eolicos-occidente/807655.html>

<http://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>

BAYÓN, L., J. M. GRAU, M. M. RUIZ, P. M. SUÁREZ (2011).- *Mathematical modelling of the combined optimization of a pumped-storage hydro-plant and a wind park*, Mathematical Modelling in Engineering & Human Behaviour, Valencia, Spain, September 6-9.