



**Universidad  
Zaragoza**

## Trabajo Fin de Máster

# HIBRIDACIÓN DE TECNOLOGÍAS RENOVABLES PARA ADAPTAR LA GENERACIÓN A LA CURVA DE DEMANDA

Autor/es

M.Carmen Lainez Peña

Director/es

Ángel Bayod Rújula

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2012

# HIBRIDACIÓN DE TECNOLOGÍAS RENOVABLES PARA ADAPTAR LA GENERACIÓN A LA CURVA DE DEMANDA

## RESUMEN

Actualmente el equilibrio entre la oferta y la demanda eléctrica se sucede en tiempo real, y el sistema soporta unos sobrecostes derivados de la sobreinstalación de potencia no gestionable.

El presente trabajo analizará la posibilidad de adaptar la generación de energía renovable a una curva previamente establecida. Para ello, el ejercicio va a satisfacer una demanda, atendiendo a la actual configuración de redes eléctricas, como un paso intermedio entre la generación centralizada y la generación distribuida.

A partir de una demanda previamente escalada, se va a garantizar la máxima energía posible ajustada a la curva de demanda, mediante un sistema híbrido fotovoltaico y eólico, compensando excesos y carencias mediante un almacenamiento.

El trabajo se realizará a partir de datos de producción horarios extraídos de instalaciones en operación, y la curva de demanda será la publicada por Red Eléctrica de España.

El alcance del trabajo se detalla a continuación:

1. Ajustar la generación de electricidad de origen fotovoltaico a la curva de demanda, y calcular el porcentaje de demanda satisfecha.
2. Ajustar la generación de electricidad de origen eólico a la curva de demanda y calcular el porcentaje de demanda satisfecha.
3. Generar conjuntamente eólica y fotovoltaica de acuerdo a la curva de demanda. Analizar su compatibilidad y calcular el porcentaje de demanda satisfecha.
4. Implementar un almacenamiento y cuantificar su mejora.
5. Incorporar un grupo biodiesel al sistema formado por la hibridación y el almacenamiento, con el objetivo de intentar cubrir la totalidad de la demanda.
6. Elaborar las conclusiones obtenidas acerca de la posibilidad de satisfacer o no la demanda. Calcular la energía de exceso, las horas de funcionamiento y la viabilidad económica de la instalación.
7. Por último, realizar un pequeño análisis de las oportunidades de mercado.

## ÍNDICE

<b>1. OBJETIVOS Y ESTRUCTURACIÓN DEL TRABAJO FIN MÁSTER .....</b>	<b>2</b>
1.1. <i>Introducción .....</i>	2
1.2. <i>Objetivos del trabajo.....</i>	3
1.3. <i>Revisión bibliográfica .....</i>	4
<b>2. CASO ANALIZADO.....</b>	<b>6</b>
2.1. <i>Datos de origen.....</i>	6
2.2. <i>Elección de la curva de demanda.....</i>	6
2.3. <i>Planta fotovoltaica generando acorde a la forma de la curva de la demanda .</i>	7
2.4. <i>Planta eólica generando acorde a la forma de la curva de la demanda.....</i>	9
2.5. <i>Planta fotovoltaica y eólica generando acorde a la forma de la curva de la demanda .....</i>	12
2.6. <i>Planta fotovoltaica-eólica con almacenamiento generando acorde a la forma de la curva de la demanda .....</i>	14
2.7. <i>Planta fotovoltaica-eólica con almacenamiento mediante baterías generando acorde a la forma de la curva de la demanda.....</i>	17
2.8. <i>Implementación de un grupo biodiesel.....</i>	20
<b>3. ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>22</b>
<b>4. OPORTUNIDADES DE MERCADO.....</b>	<b>24</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>24</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	

## 1. OBJETIVOS Y ESTRUCTURACIÓN DEL TRABAJO FIN MÁSTER

### 1.1. Introducción

Hoy en día la crisis energética mundial, originada tanto por la escasez y el elevado coste de los combustibles fósiles no renovables, como por los problemas de contaminación ambiental que estos combustibles generan, ha obligado a la utilización de fuentes de energía renovable que ayuden a superar esta crisis y disminuyan los efectos de contaminación.

Dentro de la gran variedad de generadores de energía eléctrica con recursos renovables, los generadores de energía solar fotovoltaica y eólica son los que, en la actualidad, presentan un mayor avance y desarrollo tecnológico.

Las energías renovables con una mayor eficiencia energética, combinadas, pueden además contribuir al desarrollo sostenible, al tiempo que mejoran el acceso a la energía de los más aislados. En general por sus propias características, ya sea desde el punto de vista de su limitado impacto ambiental como de la modularidad que permiten, las energías renovables resultan especialmente adecuadas tanto en el ámbito rural sin redes eléctricas (modo aislado y baja eficiencia), como en el ámbito urbano (modo en generación distribuida y alta eficiencia), como grandes centrales conectadas a las redes eléctricas de Alta Tensión. Adicionalmente, juegan un papel básico para garantizar la diversificación del mix tecnológico de la producción y, por lo tanto, para fortalecer la seguridad del suministro de energía, reduciendo la dependencia de una única fuente de aprovisionamiento.

Por otro lado, **en los mercados eléctricos el equilibrio entre demanda y oferta ocurre en tiempo real.** El sistema eléctrico actual se encarga de ajustar la oferta y la demanda de forma horaria atendiendo a criterios técnicos y económicos, teniendo el estado que retribuir instalaciones que no generan energía, sólo por el hecho de estar disponibles para cubrir áreas de la curva de la demanda que no coincide con la curva de la oferta.

Este sistema podría ser optimizado, ya sea generando acorde a la demanda o bien aplanando la demanda para que se ajuste a la generación.

La demanda de electricidad traza una curva de picos y valles, lo que hace muy difícil el ajuste de cualquier generación. Para ello **el sistema eléctrico necesita una sobre instalación de potencia la cual se va recortando, aunque tenga que ser remunerada en su totalidad, para adaptarla a la generación real.**

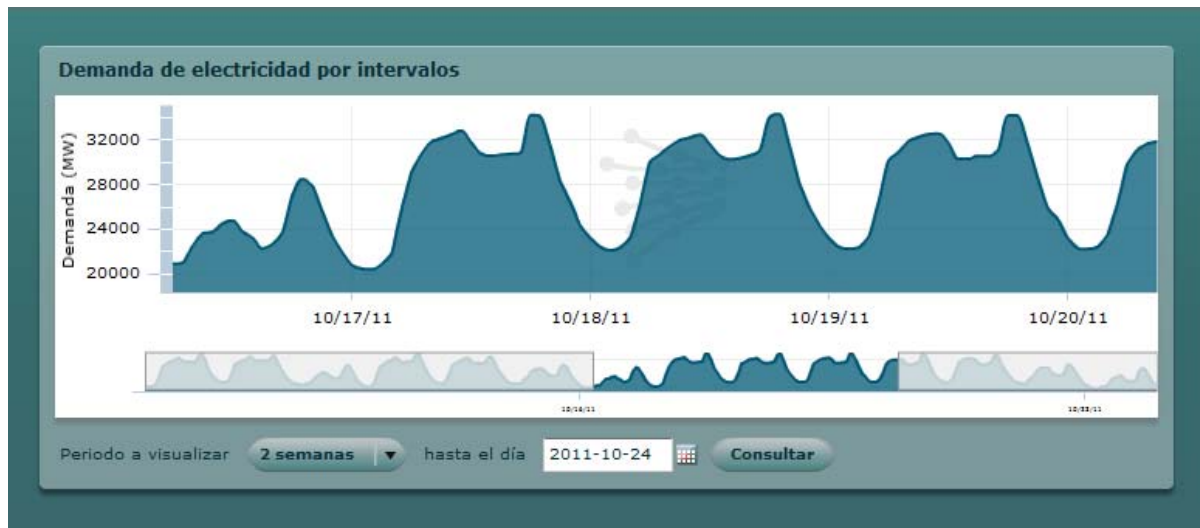


Figura1.- [http://www.ree.es/operacion/curvas\\_demanda.asp](http://www.ree.es/operacion/curvas_demanda.asp)

La situación ideal pasaría por tener una demanda constante, para ello deberíamos compensar la demanda entre el día y la noche, con esto conseguiríamos aplanar considerablemente la curva de la demanda, (aquí es donde puede jugar un papel importante el coche eléctrico, con carga de baterías nocturnas), por otra parte la generación de energía podría seguir la forma de la curva de demanda, y que la suma de todas las generaciones apiladas permitiera alcanzar la energía demandada.

### 1.2. Objetivos del trabajo

En este trabajo vamos a generar electricidad mediante un sistema híbrido de energía solar fotovoltaica y eólica, compensando la generación de energía con un pequeño almacenamiento.

**El objetivo del trabajo se centra principalmente, en averiguar lo capaz que es un sistema híbrido, con ayuda de un almacenamiento, si es preciso, de satisfacer la demanda; es decir, seguir la curva de demanda de energía del punto donde se conecte.**

Enunciamos a continuación los objetivos desglosados:

- Ajustar la producción de electricidad mediante generación fotovoltaica a la curva de la demanda y ver el porcentaje de demanda cubierta.
- Ajustar la producción de electricidad mediante generación eólica a la curva de la demanda y ver el porcentaje de demanda cubierta.

- Ajustar la producción de electricidad mediante fotovoltaica y eólica a la curva de demanda y ver el porcentaje de demanda cubierta, así como analizar la mejora de horas equivalentes netas (HEN), que se produciría en la generación fotovoltaica y eólica sin tener en cuenta la curva de demanda y limitando la instalación a la capacidad de la planta fotovoltaica.
- Implementar un almacenamiento a las situaciones anteriores y cuantificar su mejora.
- Ver las oportunidades de mercado, así como un pequeño análisis de costes y rentabilidades.

Además, continuando con la idea de la hibridación de tecnologías, se analizará su compatibilidad productiva y económica, tomando como base una planta fotovoltaica, la cual se complementará con una generación eólica, de tal manera que su generación esté limitada a la potencia de la planta fotovoltaica.

Con esta idea y teniendo en cuenta la situación económica actual, analizaremos nuevas oportunidades de negocio que no impliquen inversiones en infraestructura eléctrica adicional.

### **1.3. Revisión bibliográfica**

Analizando publicaciones vemos que los sistemas híbridos de fuentes renovables son más comunes en autoconsumos que en conexión a red. Citamos un par de ejemplos:

- En 1978 se instalaron, en una comunidad de pescadores de 250 personas llamada Las Barrancas, en Baja California Sur, 250 kW pico en módulos fotovoltaicos combinados con un aerogenerador y sistemas de colectores térmicos para satisfacer las demandas de la comunidad.
- La planta de X-Calak en el estado de Quintana Roo consiste en seis aerogeneradores de 10 kW nominales cada uno, 234 paneles de 48 W y un banco de baterías de 1.738 Ah a 220 volts.

En relación con la hibridación conectada a red, hay numerosos artículos publicados en los que se concluye que la combinación de turbina de viento y fotovoltaicas produce más que cualquiera de ambas tecnologías por separado, limitando la producción de máxima potencia y no duplicando generaciones. Dichas producciones no se cuantifican (*Ref. bibliográficas 1, 2, 3 y 4*), pero se señalan como ventajas principales:

1. Mejor adaptación a la climatología.
2. Mayor aprovechamiento de la energía.
3. Nivel de energía entregada constante todo el año.

Por otro lado y teniendo en cuenta la penetración en el sistema eléctrico de la máxima generación solar fotovoltaica, así como su mejora en combinación con la eólica, las conclusiones que se aportan son las siguientes:

- ⇒ La penetración en la red, en el caso estudiado máximo es del 17.5% y en combinación con la eólica aumenta hasta el 20%. Si se permitiera la sobreinstalación, podría llegar hasta el 30%.

**El objeto del presente trabajo se diferencia de lo hasta ahora analizado en que no se persigue la producción constante ni la maximización de la producción en kWh, sino que se intenta la gestión de la producción, modelándola hasta conseguir generar según la forma de la curva de la demanda.**

En base a este modelaje se pretende ver cómo mejora la adecuación a la curva implementando una hibridación y dos tipos diferentes de almacenamiento (*Ref. bibliográficas 10*).

## 2. CASO ANALIZADO

### 2.1. Datos de origen

Como datos de origen vamos a considerar: La curva de demanda, la generación fotovoltaica y la generación eólica.

La **curva de demanda** se ha tomado de los datos horarios de REE. Lo más exacto habría sido tomarla de la subestación de distribución donde se vierte la energía, ya que ello contribuiría al ajuste entre oferta y demanda, pero al no estar disponibles estos datos de manera pública se han considerado los datos de REE como una extrapolación de todas las subestaciones del sistema, salvando diferencias entre subestaciones en demandas industriales o domésticas. En cualquier caso, el régimen de la demanda sigue un patrón horario y estacional muy similar en todos los puntos de la península y la demanda en distribución podría ser un dato más de las condiciones de conexión que tuviera que facilitar la compañía eléctrica. *ANEXO 1*

Los **datos fotovoltaicos** son datos de producción mensual de una planta fotovoltaica de 900kW, instalada en la zona 3, zona definida en el código técnico de edificación para el cálculo de la distribución horaria de la irradiación solar global incidente sobre superficie horizontal (*Ref bibliográfica 4*). En los anexos se incluyen los datos mensuales fotovoltaicos y su extrapolación a horarios según la zona donde se encuentre incluida. *ANEXO 2*

Los **datos eólicos** son datos horarios de un aerogenerador de 600kW. Dicho aerogenerador forma parte de un parque eólico instalado en la provincia de Zaragoza. En los anexos se incluyen los datos horarios del aerogenerador. *ANEXO 3*

### 2.2. Elección de la curva de demanda

Como el dato de REE es el dato total, hay que escalarlo, al igual que haríamos con la demanda en la Subestación de conexión, con la intención de que la demanda fuera satisfecha con la suma de todas las generaciones que acuden al sistema, sin duplicidades. El compromiso de cualquier instalación sería el de satisfacer como mínimo el 85% de la demanda en la escala escogida.

Analizada la producción fotovoltaica-eólica y la demanda eléctrica, se ha considerado la curva de demanda dividida entre 150.000, resultando una curva del orden de los 150kWh, curva que nos parece puede satisfacerse con la hibridación propuesta y a continuación justificada. De esta forma se estaría cubriendo el 75% de la demanda con la hibridación fotovoltaica-eólica y se perdería un 66% de la generación renovable (*Ref. bibliográfica 6*).



No obstante, para poder justificar la elección de dicha curva, hemos descartado previamente curvas de ratio superior, que a priori podrían capacitarnos para verter más energía al sistema, y curvas de ratio inferior, que cubrirían más holgadamente la demanda pero que desperdiciarían más energía.

Como premisa, hemos impuesto que el nivel de cobertura por la hibridación sin almacenamiento sea como mínimo del 75%; por ello la elección de la curva de demanda, que abajo denominamos B (dividida entre 150.000). A continuación pasamos a representar una tabla resumen sobre las escalas de la curva de demanda de REE analizadas: *ANEXO 4*

CURVA	Ratio	% de cobertura de demanda	% de energía en exceso
A	Demanda REE / 100.000	72%	48%
B	Demanda REE / 150.000	75%	66%
C	Demanda REE / 200.000	79%	72%

*Figura 2.- Tabla resumen del análisis de las curvas de REE escaladas*

### **2.3. Planta fotovoltaica generando acorde a la forma de la curva de la demanda**

A continuación vamos a analizar la producción fotovoltaica de una planta de 900kW ubicada en la provincia de Zaragoza.

Partimos de los datos de origen y su transformación en datos horarios. La demanda se ha tomado de la información facilitada por REE y la curva a satisfacer se ha obtenido dividiendo la demanda entre 150.

La generación con recorte representa la máxima energía que podemos generar de forma horaria sin que se exceda a la demanda, y la generación sin recorte es la energía generada sin tener en cuenta dicha limitación.

A continuación presentamos la tabla resumen mensual del año, en la que se pueden apreciar los siguientes datos significativos:

- Adecuación a la curva: **45%**
- Energía excedentaria: **57%**
- Horas equivalentes netas de la instalación (generación sin recorte):1.874
- Horas equivalentes netas con una producción adecuada a la curva(generación con recorte):682

Los datos se han calculado en base a datos horarios. *ANEXO 5*

Fecha	Demanda MW	Producción fotovoltaica kW	Curva / 150	% de energía en exceso	% adecuación a la curva	Curva generación con recorte producción	Curva generación sin recorte producción
Julio	17.523.601	228.395	116.824	71%	58%	67.354	228.395
Agosto	12.409.238	156.448	82.728	72%	52%	43.213	156.448
Septiembre	16.304.278	152.390	108.695	65%	48%	52.659	152.390
Octubre	20.301.665	104.940	135.344	47%	41%	56.086	104.940
Noviembre	18.018.059	82.344	120.120	46%	37%	44.205	82.344
Diciembre	19.344.601	63.487	128.964	33%	33%	42.322	63.487
Enero	19.090.356	70.953	131.893	38%	33%	43.717	70.944
Febrero	16.561.918	131.111	110.413	61%	42%	46.301	126.467
Marzo	17.103.616	150.311	114.024	61%	45%	51.154	142.529
Abril	15.239.726	138.449	101.598	63%	51%	51.326	138.449
Mayo	15.289.494	211.121	101.930	73%	55%	56.209	211.121
Junio	15.155.360	208.901	101.036	72%	59%	59.133	208.901

Figura 3.- Tabla resumen de la generación fotovoltaica durante un año, representada mensualmente

Se ha escogido una semana de mayo para representarla de forma gráfica. Dicha semana corresponde con una producción media de energía según genere con recorte o sin recorte.

El siguiente gráfico representa la superposición de la generación horaria fotovoltaica con la demanda horaria de REE (demanda /150) en la segunda semana de Mayo.

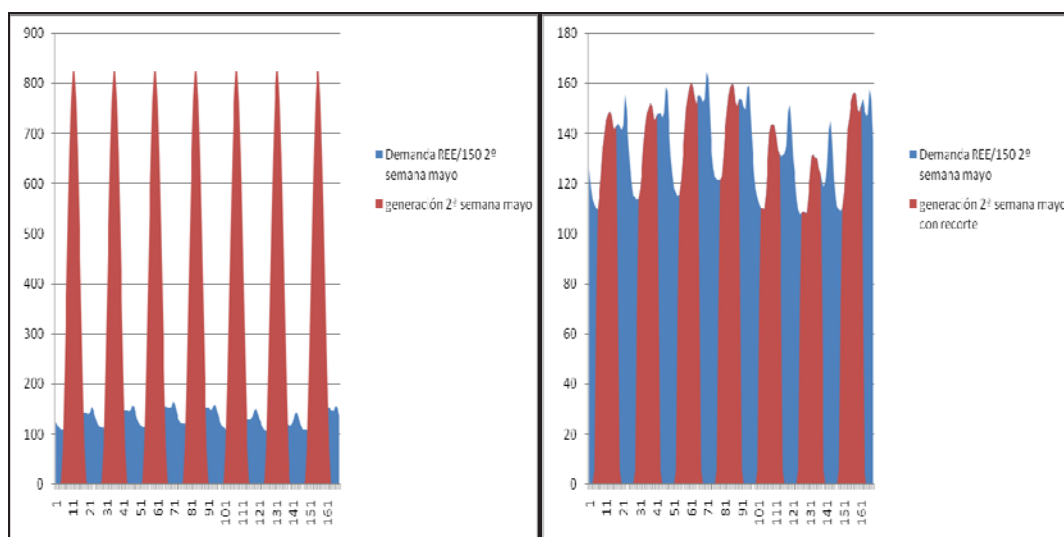
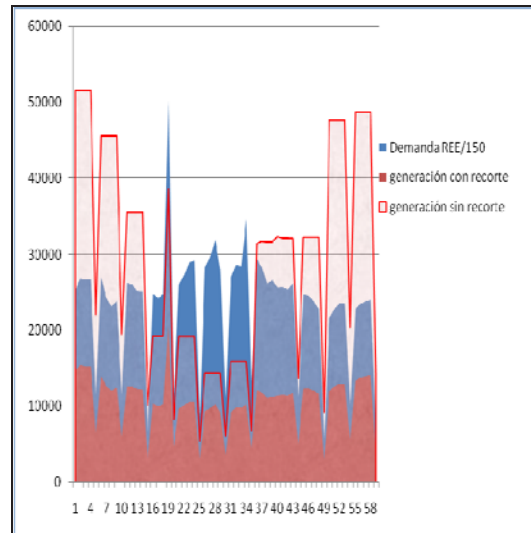


Figura 4.- Gráfica de la superposición de la generación horaria fotovoltaica con la demanda horaria de REE

A continuación podemos ver el gráfico acumulado de todas las semanas del año y como conclusión para la producción fotovoltaica, observamos que anualmente podríamos satisfacer un 45% de la demanda ajustándonos a la forma de la curva sin generar excedentes, por lo que se perdería en torno a un 57% de la producción.



*Figura 5.-Gráfico acumulado de la producción fotovoltaica anual, representada semanalmente*

#### **2.4. Planta eólica generando acorde a la forma de la curva de la demanda**

A continuación vamos a analizar la producción de un aerogenerador de 600kW ubicado en la provincia de Zaragoza.

Los datos de origen son las producciones horarias. La demanda se ha tomado de la información facilitada por REE y la curva a satisfacer se ha obtenido dividiendo la demanda entre 150.

La generación con recorte representa la máxima energía que podemos generar de forma horaria sin que se exceda a la demanda, y la generación sin recorte es la energía generada sin tener en cuenta dicha limitación.

A continuación presentamos la tabla resumen del año, en la que se puede apreciar los siguientes datos significativos:

- Adecuación a la curva: **50%**
- Energía excedentaria: **51%**
- Horas equivalentes netas de la instalación (generación sin recorte): 2.482
- Horas equivalentes netas con una producción adecuada a la curva (generación con recorte): 1.166

Los datos se han calculado en base a datos horarios, si bien a continuación se muestra el resumen mensual. *ANEXO 6*

<i>Fecha</i>	<i>Demanda MW</i>	<i>Producción eólica kW</i>	<i>Curva / 150</i>	<i>% de energía en exceso</i>	<i>% adecuación a la curva</i>	<i>Curva generación con recorte producción</i>	<i>Curva generación sin recorte producción</i>
<b>Julio</b>	17.523.601	167.430	116.824	59%	59%	69.098	167.430
<b>Agosto</b>	16.441.213	135.399	109.608	56%	54%	59.159	135.399
<b>Septiembre</b>	16.304.278	77.283	108.695	53%	33%	36.077	77.283
<b>Octubre</b>	20.301.665	99.079	135.344	45%	40%	54.713	99.079
<b>Noviembre</b>	18.018.059	137.730	120.120	48%	59%	71.089	137.730
<b>Diciembre</b>	19.344.601	136.387	128.964	53%	50%	64.124	136.387
<b>Enero</b>	19.090.356	78.726	127.269	36%	37%	46.529	74.537
<b>Febrero</b>	16.561.918	166.559	110.413	54%	63%	69.802	159.896
<b>Marzo</b>	17.103.616	138.542	114.024	52%	54%	62.104	134.295
<b>Abril</b>	15.239.726	144.855	101.598	49%	62%	62.626	134.168
<b>Mayo</b>	15.289.494	134.582	101.930	55%	59%	60.522	134.582
<b>Junio</b>	15.155.360	98.120	101.036	56%	43%	43.597	98.120

*Figura 6.-Tabla resumen de la generación eólica durante un año, representada mensualmente*

Se ha escogido una semana de mayo para representarla de forma gráfica. Dicha semana corresponde con una producción media de energía según genere con recorte o sin recorte.

El siguiente gráfico representa la superposición de la generación horaria eólica con la demanda horaria de REE (demanda /150) en la segunda semana de Mayo.

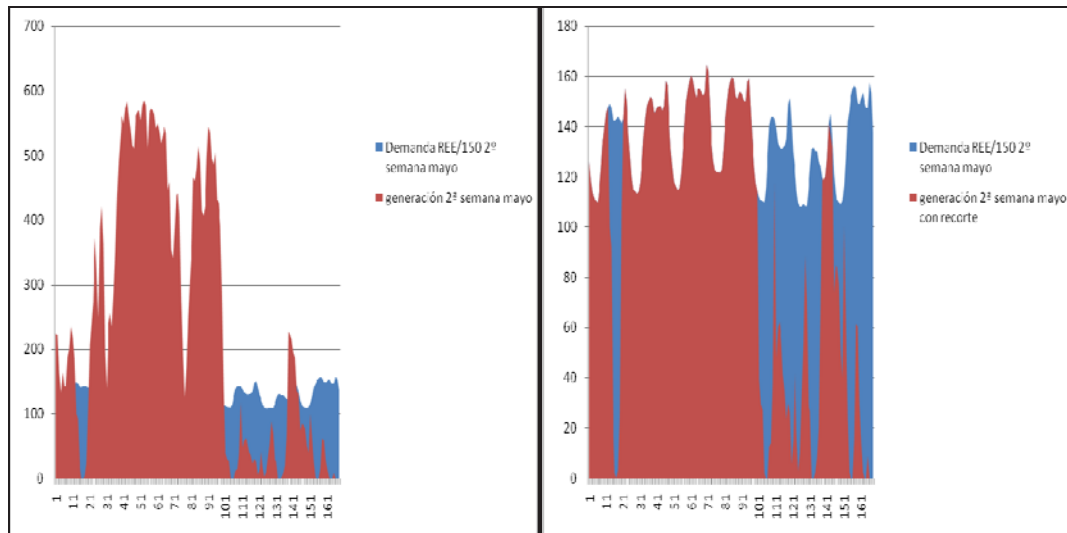


Figura 7.-Gráfica de la superposición de la generación horaria eólica con la demanda horaria de REE

A continuación podemos ver el gráfico acumulado de todas las semanas del año. Como conclusión para la producción eólica, se observa que anualmente podríamos satisfacer un 50% de la demanda ajustándonos a la forma de la curva sin generar excedentes, por lo que se perdería en torno a un 51% de la producción.

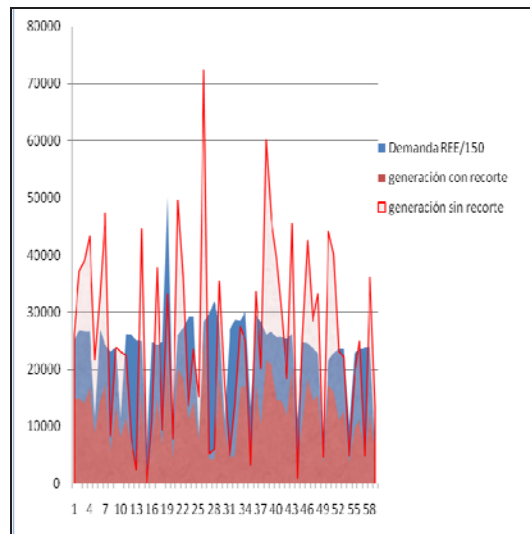


Figura 8.-Gráfico acumulado de la producción eólica anual, representada semanalmente

## 2.5. Planta fotovoltaica y eólica generando acorde a la forma de la curva de la demanda

En este caso y para poder valorar su complementariedad, vamos a analizar la producción del aerogenerador solapado con la producción de la planta fotovoltaica, es decir, hemos sumado las dos producciones anteriores y se ha analizado como ha satisfecho la demanda comprometida.

A continuación presentamos la tabla resumen del año, en la que se puede apreciar los siguientes datos significativos:

- Adecuación a la curva: **75%**
- Energía excedentaria: **66%**
- Horas equivalentes netas de la instalación (generación sin recorte):2.155
- Horas equivalentes netas con una producción adecuada a la curva (generación con recorte):687

Los datos se han calculado en base a datos horarios, si bien a continuación se muestra el resumen mensual. *ANEXO 7*

Fecha	Demanda MW	Producción fotovoltaica kW	Producción eólica kW	Curva demanda /150	Foto y eólica	Curva generación con recorte producción	Curva generación sin recorte producción
<b>Julio</b>	17.523.601	228.395	167.430	116.824	395.825	101.958	395.825
<b>Agosto</b>	16.441.213	202.079	135.399	109.608	337.478	89.067	337.478
<b>Septiembre</b>	16.304.278	152.390	77.283	108.695	229.674	73.829	229.674
<b>Octubre</b>	20.301.665	104.940	99.216	135.344	204.156	89.054	204.156
<b>Noviembre</b>	18.018.059	82.344	137.730	120.120	220.074	91.258	220.074
<b>Diciembre</b>	19.344.601	63.487	136.387	128.964	199.874	86.426	199.874
<b>Enero</b>	19.090.356	70.953	78.726	127.269	149.679	76.430	149.679
<b>Febrero</b>	16.561.918	131.111	139.523	110.413	270.634	84.952	270.586
<b>Marzo</b>	17.103.616	150.311	138.542	114.024	288.853	86.723	288.853
<b>Abril</b>	15.239.726	138.449	144.855	101.598	283.304	84.302	283.304
<b>Mayo</b>	15.289.494	211.121	134.582	101.930	345.703	85.746	345.703
<b>Junio</b>	15.155.360	208.901	98.120	101.036	307.021	80.770	307.021

*Figura 9.-Tabla resumen de la generación conjunta fotovoltaica y eólica durante un año, representada mensualmente*

Se ha escogido una semana de mayo para representarla de forma gráfica. Dicha semana corresponde con una producción media de energía según genere con recorte o sin recorte.

El siguiente gráfico representa la superposición de la generación horaria conjunta (fotovoltaica + eólica) con la demanda horaria de REE (demanda /150) en la segunda semana de Mayo.

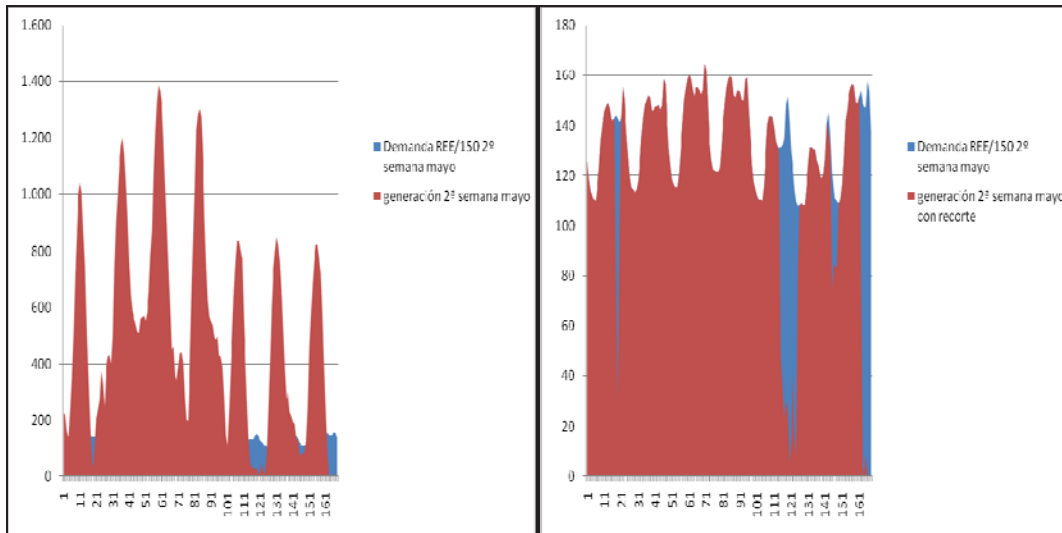


Figura 10.\_Gráfica de la superposición de la generación horaria conjunta fotovoltaica y eólica con la demanda horaria de REE

A continuación podemos ver el gráfico acumulado de todas las semanas del año. Como conclusión para la producción combinada, observamos que anualmente podríamos satisfacer un 75% de la demanda ajustándonos a la forma de la curva sin generar excedentes, por lo que se perdería entorno a un 66% de la producción.

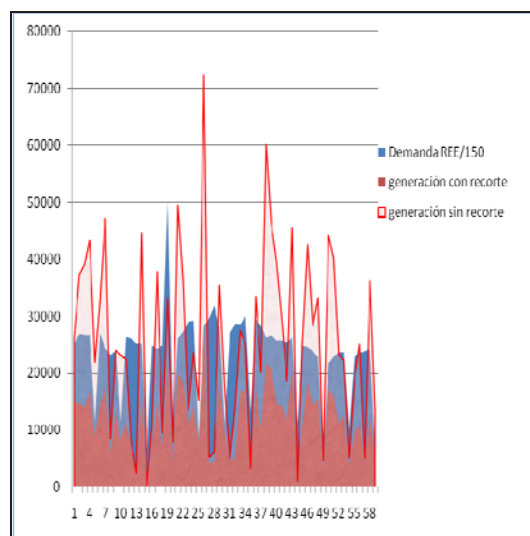


Figura 11.-Gráfico acumulado de la producción conjunta fotovoltaica y eólica anual, representada semanalmente

**Como conclusión, sólo con la combinación de la eólica y la fotovoltaica la generación ajustada a la curva de la demanda mejora entre un 25-30%, aunque genera un 15% más de energía en exceso. En términos absolutos es más óptima la generación conjunta que por separado, ya que la mejora en cuanto al vertido de energía a la red es mayor que la energía en exceso que se pierde.**

De forma paralela, planteamos este mismo caso de generación conjunta suponiendo que la planta fotovoltaica es existente, por lo que la potencia máxima a evacuar será la de dicha planta fotovoltaica. Bajo este supuesto, analizaremos los datos obtenidos comparando la generación conjunta con la generación de la planta fotovoltaica sola, sin ajustarla a la curva de demanda, pero limitándola a la producción máxima (900 kW):

- Energía excedentaria: 4%
- Horas equivalentes netas de la instalación (generación sin recorte): 2.155
- Horas equivalentes netas de la instalación (generación limitada a la producción máxima de la planta fotovoltaica): 2.066
- Horas equivalentes netas de la instalación (generación limitada a la producción máxima de la planta fotovoltaica, considerando como potencia instalada la de la planta fotovoltaica): 3.443
- Incremento de la producción de la planta: 67%

Observamos que la hibridación conseguida es óptima, lo que nos hace pensar que para este emplazamiento o para emplazamientos de similares características, la potencia eólica que complementa la planta fotovoltaica, tiene que ser del orden del 70% de la potencia de la planta, que va alineado con el porcentaje de producción.

## **2.6. Planta fotovoltaica-eólica con almacenamiento generando acorde a la forma de la curva de la demanda**

El siguiente ejercicio se trata de añadir en la instalación un almacenamiento, de tal forma que se aproveche lo máximo posible de la energía desechada. El almacenamiento viene limitado por la potencia y el tiempo (*Ref. bibliográfica 10*).

Se podría haber considerado un almacenamiento de hidrógeno, pero su rendimiento no superaba el 25 %, confirmado con proyectos experimentales como el Proyecto Utsira (Noruega), (tesis hidrógeno Análisis de sistemas integrados de hidrógeno y producción eólica) (*Ref. bibliográficas 4 y 8*).

El almacenamiento Small-CAES se ha descartado, debido a las dimensiones que tendría que tener el depósito, haciendo inviable la instalación (*Ref. bibliográficas 5 y 9*).



Descartando los dos anteriores, vamos a analizar en primera instancia **un bombeo con dos depósitos** de las siguientes características (Ref. bibliográficas 7 y 11):

⇒ Caudal calculado: 11 m<sup>3</sup>/s, que son 11000l/s. Hay una turbina Kaplan de 5000l/s, es decir, necesitaríamos dos horas para llenarla y dos horas para vaciarla.

⇒ De forma grosera, la energía potencial en W será:

$$E=4000\text{m}^3 \cdot 9.8/3600=10\text{kW},$$

por lo que, para 100kW necesitaríamos dos balsas de 40.000m<sup>3</sup>, que, comparándolas con el embalse de las Parras no son demasiado grandes. Limitaremos a 100kW, la capacidad del bombeo, y consideraremos un rendimiento de un 40%.

Como en el anterior ejercicio, analizamos la producción del aerogenerador solapado con la producción de la planta fotovoltaica, pero implementando un pequeño bombeo de agua.

Partimos de los datos de origen horarios. La demanda se ha tomado de la información facilitada por REE y la curva a satisfacer se ha obtenido dividiendo la demanda entre 150.

La generación con recorte representa la máxima energía que podemos generar de forma horaria sin que se exceda a la demanda, y la generación sin recorte es la energía generada sin tener en cuenta dicha limitación, pero descontando la energía que se utiliza en el bombeo.

A continuación presentamos la tabla resumen del año, en la que se pueden apreciar los siguientes datos significativos: *ANEXO 8*

- Adecuación a la curva: **78%**
- Energía excedentaria: **63%**
- Horas equivalentes netas con una producción adecuada a la curva: 712

Fecha	Demanda MW	Curva demanda /150	Foto y eólica	Curva generación con recorte producción	Curva generación sin recorte producción	HEN
Julio	17.523.601	116.824	395.825	103.970	394.751	69
Agosto	16.441.213	109.608	337.478	91.382	336.673	61
Septiembre	16.304.278	108.695	229.674	76.616	223.036	51
Octubre	20.301.665	135.344	204.156	92.891	200.547	62
Noviembre	18.018.059	120.120	220.074	93.837	219.022	63

Fecha	Demanda MW	Curva demanda /150	Foto y eólica	Curva	Curva	HEN
				generación con recorte producción	generación sin recorte producción	
Diciembre	19.344.601	128.964	199.874	89.090	199.479	59
Enero	19.090.356	127.269	149.679	86.751	150.074	58
Febrero	16.561.918	110.413	270.634	87.073	267.642	58
Marzo	17.103.616	114.024	288.853	89.244	288.204	59
Abril	15.239.726	101.598	283.304	86.328	282.478	58
Mayo	15.289.494	101.930	345.703	88.155	344.292	59
Junio	15.155.360	101.036	307.021	83.039	306.192	55

Figura 12.- Tabla resumen de la generación conjunta fotovoltaica y eólica durante un año, con almacenamiento por bombeo, representada mensualmente<sup>1</sup>

Se ha escogido una semana de mayo para representarla de forma gráfica. Dicha semana corresponde con una producción media de energía según genere con recorte o sin recorte.

El siguiente gráfico representa la superposición de la generación horaria eólica y fotovoltaica, con la demanda horaria de REE (demanda /150) en la segunda semana de Mayo.

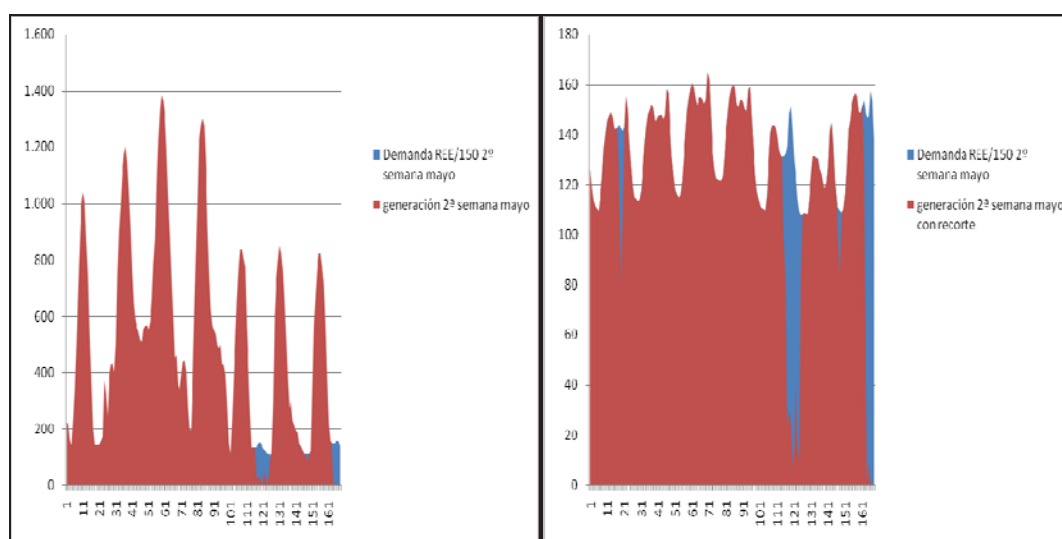


Figura 13.\_ Gráfica de la superposición de la generación horaria conjunta fotovoltaica y eólica, con almacenamiento mediante bombeo, con la demanda horaria de REE

<sup>1</sup> La tabla obedece a las siguientes consignas:

- La descarga del depósito se limita a 50 kW/h y un máximo de 100 kW.
- La carga se limita a 50 kW/h, teniendo en cuenta un rendimiento del 40%.

En resumen para la producción eólica y fotovoltaica con almacenamiento mediante bombeo, anualmente podríamos satisfacer la demanda ajustándonos a la forma de la curva y sin excedentes en un 78% de la demanda, se perdería entorno al 63% de la generación renovable.

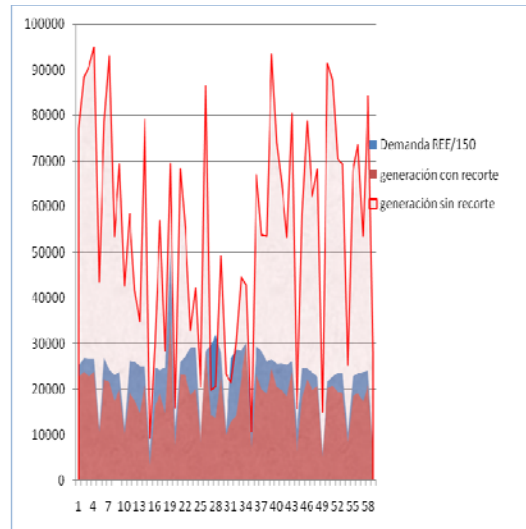


Figura 14.-Gráfico acumulado de la producción conjunta fotovoltaica y eólica anual, con almacenamiento mediante bombeo, representada semanalmente

Comparándola con la situación anterior, el almacenamiento mediante bombeo supone una mejora de un 3%, que en términos absolutos representa una producción anual de 37.860KW.

### 2.7. Planta fotovoltaica-eólica con almacenamiento mediante baterías generando acorde a la forma de la curva de la demanda

Visto el comportamiento del bombeo, vamos a analizar el comportamiento de un almacenamiento mediante baterías de Pb-ácido, muy comunes en el mercado.

Para seleccionar la batería y hacernos idea del dimensionamiento de la misma, hemos tenido en cuenta una demanda de 100KWh, durante 14 horas al día como máximo (se ha verificado que es el máximo tiempo seguido, sin generación convencional, que puede estar la central sin satisfacer a la demanda). Para la autonomía con un día sería suficiente, dado que la mayoría de los días hay generación en exceso, pero lo calcularemos para 2 días. Se va a elegir una tensión de referencia de trabajo en DC, en este caso la del aerogenerador en 690V, y la profundidad de descarga del 80%. (Ref. bibliográfica 13)

$$Q=110*1000000*14*Wh/día*2/(690*80)=5580Ah$$

Es decir, para una batería de plomo convencional necesitaremos unas 50 baterías 100Ah.

La batería seleccionada para el cálculo genera 112kWh, con las siguientes consideraciones:

- Tiempo de carga completa de 24 horas.
- Rendimiento del 90%.
- Para la descarga (que es el aporte de generación a la planta), se ha considerado que puede generar 112kWh, es decir, se descarga durante 10 horas.
- Y, finalmente, tendremos en cuenta una profundidad máxima de descarga de un 80%, estando previamente cargada.

Hemos seleccionado esta batería para poder ver su comportamiento comparativamente frente al bombeo, dado que ambos son de una capacidad similar.

Como en el anterior ejercicio, analizamos la producción del aerogenerador solapado con la producción de la planta fotovoltaica, pero implementando la batería anteriormente descrita. *ANEXO 9*

A continuación presentamos la tabla resumen del año, en la que se pueden apreciar los siguientes datos significativos:

- Adecuación a la curva: 81%
- Energía excedentaria: **52%**
- Horas equivalentes netas con una producción adecuada a la curva: 740

Fecha	Demanda MW	Curva demanda /150	Foto y eólica	Curva	Curva	HEN
				generación con recorte producción	generación sin recorte producción	
Julio	17.523.601	116.824	395.825	108.669	369.901	72
Agosto	16.441.213	109.608	337.478	95.920	311.199	64
Septiembre	16.304.278	108.695	229.674	79.232	203.400	53
Octubre	20.301.665	135.344	204.156	95.132	168.222	63
Noviembre	18.018.059	120.120	220.074	95.979	196.430	64
Diciembre	19.344.601	128.964	199.874	90.895	180.092	61
Enero	19.090.356	127.269	149.679	87.465	133.958	58
Febrero	16.561.918	110.413	270.634	88.520	246.587	59
Marzo	17.103.616	114.024	288.853	93.769	264.258	63
Abril	15.239.726	101.598	283.304	91.141	258.545	61
Mayo	15.289.494	101.930	345.703	95.301	319.746	64
Junio	15.155.360	101.036	307.021	87.443	277.957	58

Figura 15.-Tabla resumen de la generación conjunta fotovoltaica y eólica durante un año, con almacenamiento por baterías, representada mensualmente

Se ha escogido una semana de mayo para representarla de forma gráfica. Dicha semana corresponde con una producción media energía según genere con recorte o sin recorte.

El siguiente gráfico representa la superposición de la generación horaria eólica y fotovoltaica con almacenamiento con baterías, con la demanda horaria de REE (demanda /150) en la segunda semana de Mayo.

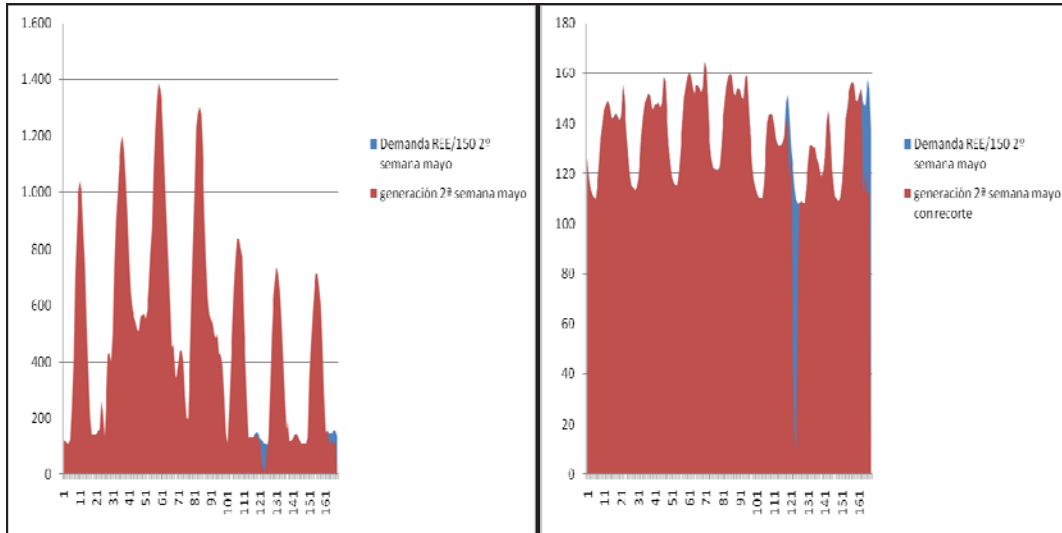


Figura 16.-Gráfica de la superposición de la generación horaria conjunta fotovoltaica y eólica, con almacenamiento mediante baterías, con la demanda horaria de REE

En resumen, para la producción eólica y fotovoltaica con almacenamiento mediante baterías, anualmente podríamos satisfacer la demanda ajustándonos a la forma de la curva y sin excedentes en un 81% de la demanda, se perdería en torno al 52% de la generación renovable.

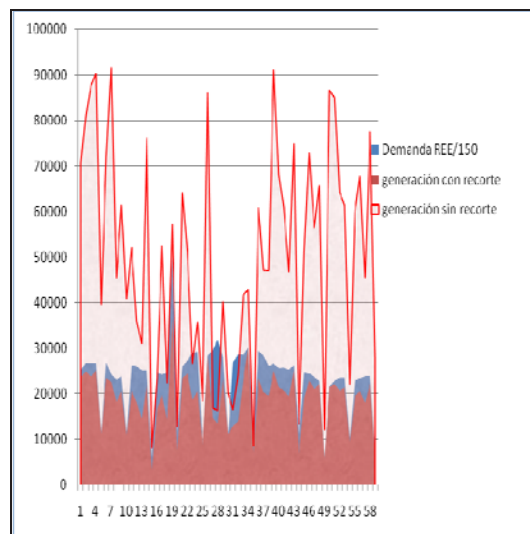


Figura 17.-Gráfico acumulado de la producción conjunta fotovoltaica y eólica anual, con almacenamiento mediante baterías, representada semanalmente

Comparándola con la situación base sin almacenamientos, el almacenamiento mediante baterías, supone una mejora de un 6%, que en términos absolutos representa una producción anual de 78.953 kW.

### **2.8. Implementación de un grupo biodiesel**

El biodiesel es un combustible limpio y, gracias a él, se consigue disminuir notablemente las emisiones de gases de efecto invernadero. Si lo comparamos con el diesel petrolífero (gasoil A), el biodiesel produce un 30% menos de emisiones de CO<sub>2</sub>, un 40% menos de humos, un 80% menos de óxido de carbono y casi el 100% menos de dióxido de azufre. La combustión del biodiesel reduce en un 60% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados y entre el 75% y el 90% la de los hidrocarburos aromáticos.

Según una última publicación del Grupo Ecológico Natural GEN, que cuenta con plantas productivas de biodiesel en las Islas Baleares, el precio puede oscilar entre un 20-30% más barato que el diesel convencional.

Para determinar las horas que necesitaríamos conectar el grupo y la mejora que significaría, hemos analizado 4 meses del año, llegando a las siguientes conclusiones.

#### *ANEXO 10*

- Adecuación a la curva: **97%**
- Energía excedentaria: **53%**
- Horas equivalentes netas con una producción adecuada a la curva: 895

Se ha escogido una semana de mayo para representarla de forma gráfica. Dicha semana corresponde con una producción media energía según genere con recorte o sin recorte.

El siguiente gráfico representa la superposición de la generación horaria eólica y fotovoltaica con almacenamiento con baterías, con la demanda horaria de REE (demanda /150) en la segunda semana de Mayo.

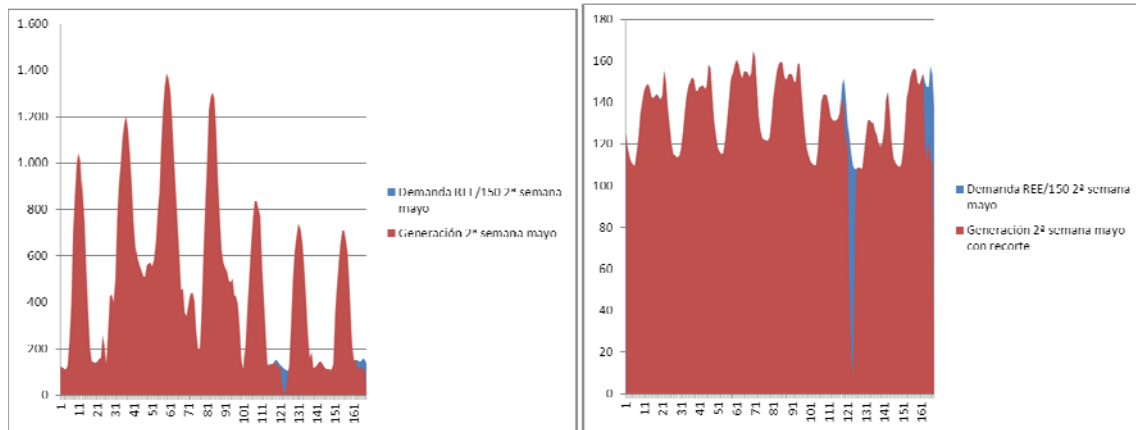


Figura 18.-Gráfica de la superposición de la generación horaria conjunta fotovoltaica y eólica, con almacenamiento mediante baterías y grupo biodiesel, con la demanda horaria de REE

En resumen, para la producción eólica y fotovoltaica con almacenamiento por baterías y grupo biodiesel, anualmente podríamos satisfacer la demanda ajustándonos a la forma de la curva y sin excedentes en un 97% de la demanda, se perdería en torno al 53% de la generación renovable.

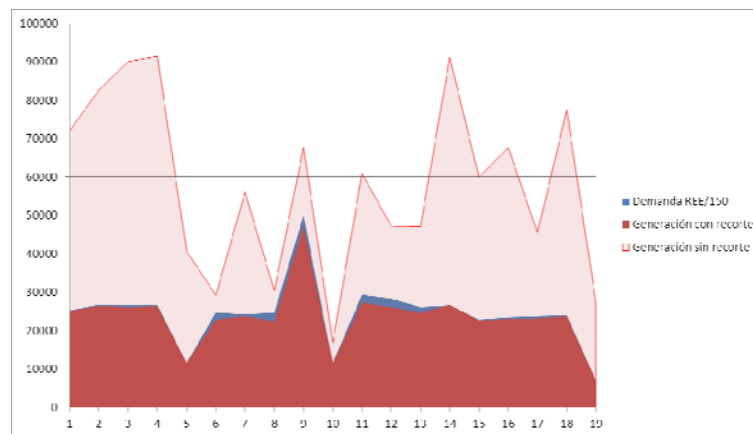


Figura 19.-Gráfico acumulado de la producción conjunta fotovoltaica y eólica anual, con almacenamiento mediante baterías y grupo biodiesel, representada semanalmente

Comparándola con la situación base sin almacenamientos, el almacenamiento mediante baterías y grupo biodiesel, supone una mejora de un 22%, resultando claramente la mejor opción.

### 3. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el caso analizado de generación acorde a la demanda, el presupuesto total de la más favorable de las opciones estudiadas (fotovoltaica + eólica + almacenamiento con baterías + grupo biodiesel) es el siguiente:

CONCEPTO	IMPORTE (€)
Obra civil	302.400
Obra eléctrica	496.800
Planta solar	2.160.000
<b>Planta fotovoltaica 900kW</b>	<b>2.959.200</b>
Obra civil	45.000
Obra eléctrica	15.000
aerogenerador	240.000
<b>Aerogenerador 600kW</b>	<b>300.000</b>
Obra civil	15.000
Obra eléctrica	15.000
Planta solar	300.000
<b>Baterías 120kWh</b>	<b>330.000</b>
<b>Grupo diesel 100kW</b>	<b>13.000</b>
<b>TOTAL</b>	<b>3.602.200</b>
Inversión/kW	2.401

*Figura 20.-Tabla resumen del presupuesto total de la instalación de una planta eólica más una fotovoltaica, con almacenamiento mediante baterías y grupo biodiesel.*

En la página siguiente se refleja el estudio de viabilidad realizado para la opción mencionada.



<u>INVERSION</u>	INVERSION TOTAL: 3.602.200,00 € sin IVA TIPO DE PARQUE: 1 TIPO DE TARIFA: 4 DESCRIPCION RD661/2007: TARIFA DE MERCADO N° DE AÑOS: 20 AÑO INICIO ESTUDIO: 2.014 AÑO INICIO PRODUCCION: 2.014 AÑO FINALIZACION: 2.033 APORTACION DE SOCIOS (%): 25,00% 900.550,00 € APALANCAMIENTO (%): 75,00% 2.701.650,00 €																
<u>GENERACION</u>	N° TOTAL AEROGENERADORES: 1 POTENCIA AEROGENERADOR: 1.620 kW POTENCIA TOTAL PARQUE: 1.620 kW PERDIDA PRODUCCION ANUAL: 1,10% HORAS EQUIVALENTES AÑO: 895 h FACTOR DE CAPACIDAD (%): 10,22% PRODUCCION NETA ANUAL: 1.449.900 kWh INVERSION POR KW: 2.224 €/kW																
<u>PRECIOS</u>	PRECIO KW TARIFA ELECTRICA: 0,4900 €/kW IPC ESTIMADO: 3,00% IPC ELECTRICO: 0,00% TASA REPARTO B° A DIVIDENDOS (%): 8,00% IMPUESTO SOCIEDADES (%): 35,00% IVA: 21,00%																
<u>PRESTAMO</u>	N° AÑOS REEMBOLSO PRESTAMO: 15 CANTIDAD FINANCIADA: 2.701.650,00 € TIPO PRESTAMO: FRANCES INICIO PRESTAMO: 01/01/2014 INTERES ANUAL (%): 8,00% TASA DESCUENTO CALCULO VAN (%): 3,00% INTERES TESORERIA (%): 0,00%																
<u>GASTOS</u>	COSTES INICIALES: - € GASTOS EXPLOTACION Y MTO: 4,00% /Ingresos OTROS GASTOS ANUALES: 217.328,00 € /Año																
<u>AMORTIZACION</u>	AÑOS AMORTIZACION INVERSION: 10,0 % AMORTIZACION: 10,00%																
<u>PLAZOS Y DESEMBOLSOS</u>	ESTUDIO Y PROYECTO: - € JULIO 2012 COMIENZO DE LAS OBRAS: 900.550,00 € ENERO 2014 PUESTA EN FUNCIONAMIENTO: ENERO 2014																
<u>RENTABILIDAD</u>	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"><b>INVERSION SIN APALANCAMIENTO (RENTABILIDAD DEL PROYECTO)</b></td> </tr> <tr> <td>TIR</td> <td>6,08%</td> </tr> <tr> <td>VAN</td> <td>793.254</td> </tr> <tr> <td>PAYBACK</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><b>INVERSION CON APALANCAMIENTO (RENTABILIDAD PARA EL ACCIONISTA)</b></td> </tr> <tr> <td>TIR</td> <td>5,35%</td> </tr> <tr> <td>VAN</td> <td>161.848</td> </tr> <tr> <td>PAYBACK</td> <td>0</td> </tr> </table>	<b>INVERSION SIN APALANCAMIENTO (RENTABILIDAD DEL PROYECTO)</b>		TIR	6,08%	VAN	793.254	PAYBACK	0	<b>INVERSION CON APALANCAMIENTO (RENTABILIDAD PARA EL ACCIONISTA)</b>		TIR	5,35%	VAN	161.848	PAYBACK	0
<b>INVERSION SIN APALANCAMIENTO (RENTABILIDAD DEL PROYECTO)</b>																	
TIR	6,08%																
VAN	793.254																
PAYBACK	0																
<b>INVERSION CON APALANCAMIENTO (RENTABILIDAD PARA EL ACCIONISTA)</b>																	
TIR	5,35%																
VAN	161.848																
PAYBACK	0																

#### **4. OPORTUNIDADES DE MERCADO**

A la vista del trabajo realizado, la implantación de instalaciones renovables y no renovables debería sufrir un cambio conceptual. Éstas deben ser instalaciones que se puedan adaptar a la demanda aunque ello implique reducción de la generación, lo que conlleva el análisis de las retribuciones, tanto de las instalaciones que puedan ajustarse a la demanda como de aquellas que no pueden.

Las instalaciones deberían garantizar un porcentaje de ajuste a la demanda y, del mismo modo que algunas instalaciones renovables en la actualidad deben dar la previsión de generación, el sistema debería ser capaz de dar una previsión de demanda.

El porcentaje de ajuste debería ser más fino o más grosero dependiendo de la red a la que se conecten; si la conexión es en redes débiles poco interconexionadas, se debería exigir un mayor ajuste. Por el contrario, cabría más flexibilidad si la interconexión se realiza en una red mallada.

Esta nueva concepción permitiría el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento, del mismo modo que las centrales tendrían que complementarse. Podrían ser por ejemplo, instalaciones fotovoltaicas de día con parques eólicos nocturnos y poco a poco la tendencia sería la suma de pequeñas instalaciones y no a macroinstalaciones que no pueden modularse.

Por otro lado, también podrían optimizarse instalaciones renovables ejecutadas y en operación. En relación a la eólica, en países que empezaron pronto con la generación de dicha energía, situaron los aerogeneradores en lugares con gran recurso eólico. Dado que los mejores lugares en lo que al viento se refiere están ocupados por los viejos aerogeneradores con menores producciones de energía que los nuevos, se debería empezar a reemplazar los viejos aerogeneradores por nuevos, lo que la legislación denomina repotenciación.

Pero ¿qué hacer con estos aerogeneradores usados?. Tal y como hemos visto, las instalaciones fotovoltaicas tienen capacidad de absorber aerogeneradores como complemento de generación.

En consecuencia, por un lado se permitiría la creación de un mercado de segunda mano que complementarías las instalaciones existentes, sin tener que invertir adicionalmente en infraestructura eléctrica. Por otro lado, se liberaría potencia y espacio en instalaciones amortizadas para la instalación de tecnología nueva que optimizara la generación de energía sin recorte.

## 5. CONCLUSIONES

La combinación estudiada de generación eólica y fotovoltaica, para satisfacer una generación ajustada a la curva de la demanda, mejora entre un 25-30%, aunque genera un 15% más de energía en exceso. En términos absolutos y no económicos, es más óptima la generación conjunta que por separado, ya que la mejora en cuanto al vertido de energía a la red es mayor que la energía en exceso que se pierde.

El almacenamiento mediante bombeo analizado supone una mejora de un 3%, que en términos absolutos representa una producción anual de 37.860KW.

El almacenamiento mediante baterías estudiado supone una mejora de un 6%, que en términos absolutos representa una producción anual de 78.953 kW.

A continuación se muestra el resumen de los resultados obtenidos

TIPO GENERACIÓN	ADECUACIÓN A CURVA en %	ENERGÍA EXCEDENTARIA en %	HEN
FOTOVOLTAICA	45	57	682
EÓLICA	50	51	1.166
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA	75	66	687
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA CON ALMACENAMIENTO POR BOMBEO	78	63	712
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA CON ALMACENAMIENTO POR BATERÍAS	81	72	740
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA CON ALMACENAMIENTO POR BATERÍAS Y GRUPO BIODIESEL	97	53	895

Figura 21.\_ Tabla resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los casos estudiados.

En cuanto a la viabilidad del proyecto, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- **Tarifa eléctrica:** para la elección de la tarifa eléctrica nos hemos basado en el Real Decreto 661/2007, que regula la actividad de producción de energía eléctrica en Régimen Especial, y tarifa a la que están produciendo la mayor parte de las plantas fotovoltaicas en España, aunque sabemos que actualmente esta retribución ha sido revisada a la baja y a su vez se ha limitado la producción de la planta con retribución primada.

b.1.1 Fotovoltaico =<100kW = 0,488743 €/kWh

**Por tanto, el precio que aparece en el estudio (0,49) sería el valor de la tarifa de mercado a partir de la cual comienza a ser rentable la instalación.**

- **Ratio de potencia instalada y producción eléctrica:** el estudio refleja una producción total de 1.450 MWh año. Las horas equivalentes se estiman en 895 h/año. La potencia instalada es de 1.620 kW

Se observa que los valores del Estudio no son magnitudes comparables con los modelos a los que estamos acostumbrados, que intentan maximizar la producción.

Se debería poner en valor otros ratios, como aparecen en el estudio.

Por otro lado, queremos destacar la mejora de producción de la hibridación eólica y fotovoltaica con respecto a la planta fotovoltaica de origen, ajustando la generación a la potencia nominal de la planta original, de tal manera que no suponga inversión adicional en infraestructura eléctrica.

- Horas Equivalentes Netas fotovoltaica (sin recorte): 1.874
- Horas Equivalentes Netas fotovoltaica + eólica (generación limitada a 900 kW): 3.443
- Producción fotovoltaica: 1.698.851 kWh
- Producción total fotovoltaica + eólica (generación limitada a 900 kW): 2.840.431 kWh

Dicha mejora desde el punto de vista económico resulta rentable y ejecutable, aun considerando a precio mercado la producción adicional (actualmente se considera que un parque eólico de 3.000 HEN con un inversión de 1,0M€ por MW instalado, resulta rentable a mercado)