

Resultados

3.1 Introducción

Como se puede observar en la Figura 3.1 a) y b), el abastecimiento de energía por tipos, para cubrir la demanda, está relacionado con la potencia instalada de cada tipo de energía.

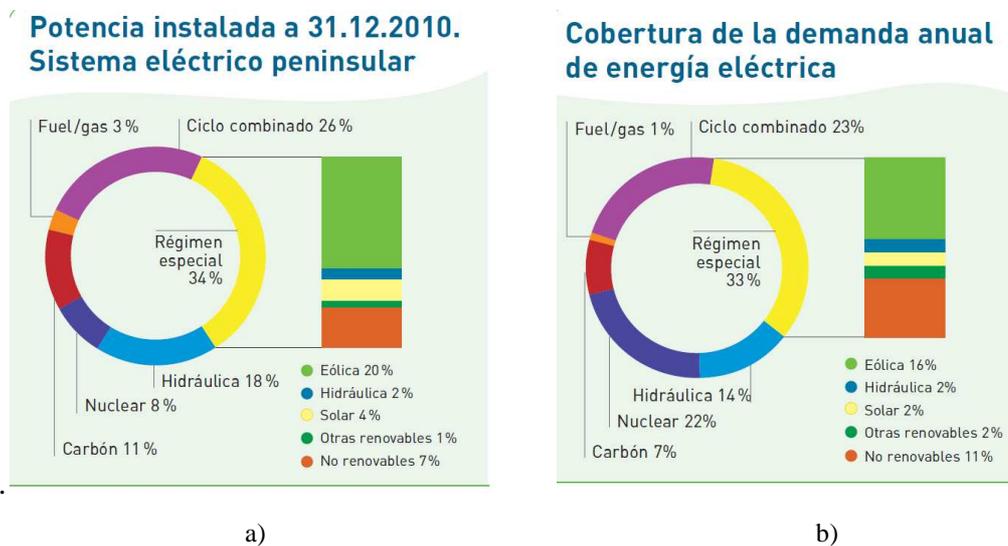


Figura 3.1. Potencia instalada, a) y Demanda anual de energía eléctrica, b) [5]

En España, la potencia térmica instalada es de un 50% de la potencia total instalada entre todas las energías, y la forman centrales nucleares, centrales térmicas de carbón, ciclos combinados, centrales de fuel o gas y centrales solares, y sin embargo, a la hora de cubrir con las distintas fuentes de energía la demanda, un 55% de la energía es de origen térmico como puede observarse en la Figura 3.1. Por tanto, la base térmica que se va a tener en cuenta en la realización de este proyecto es del 55% de la media de la demanda de los días que han sido tomados en consideración.

Además de la base térmica, se ha de considerar en la base también la energía hidráulica como tal, que aunque entra dentro de las energías renovables no está dentro de las energías en régimen especial y, por tanto, tampoco en la parte de turbinado del excedente de energía eólica.

Teniendo en cuenta esto, la base fija de generación cubierta será de un 80% de la demanda. Este trabajo tiene en cuenta ese mismo porcentaje pero de la media de energía demandada en dos días considerados con la misma demanda diaria entre ellos.

Se considerarán dos días iguales en demanda entre ellos y, además, que sean los de mayor demanda del año. Los datos considerados en este trabajo son los de la Figura 3.2, referidos al año 2010, que hacen referencia al día 11 de Enero, día de mayor consumo energético del año.

De la Figura 3.2, se puede extraer la Tabla 3.1 de energía demandada de un día en GWh en intervalo horario.

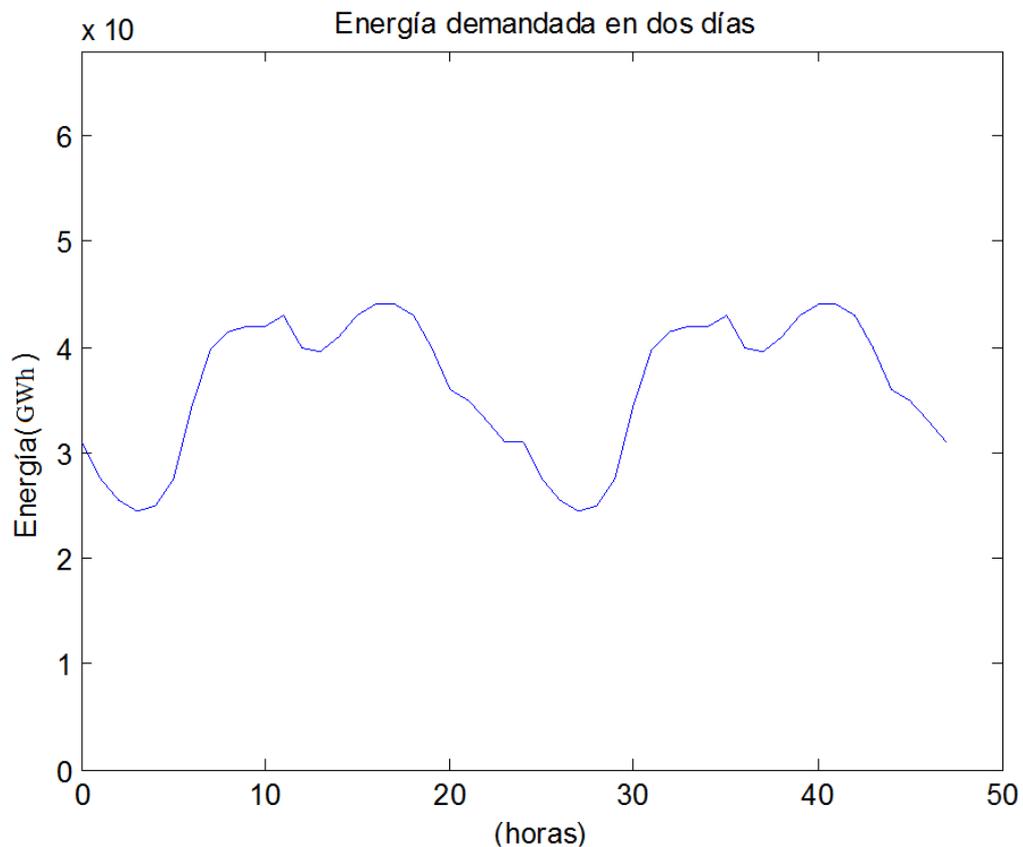


Figura 3.2. Curva de carga de los días de máxima demanda [5]

Tabla 3.1. Energía demandada el 11 de Enero de 2010 [11]

Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Energía (GWh)	31	27.5	25.5	24.5	25	27.5	34.5	39.5	41.5	42	42	43
Horas	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Energía (GWh)	40	39.5	41	43	44	44	43	40	36	35	33	31

Los datos de energía demandada de las siguientes veinticuatro horas son los mismos que los de las primeras veinticuatro, ya que la demanda energética es igual para cada día considerado.

Como se puede observar en la Tabla 3.2, la potencia instalada de energía eólica llegó a alcanzar el valor de 20.06 GW en el año 2010. Por ello, en este proyecto, se va a trabajar con aerogeneradores de 2MW, para que el escalado al sistema eléctrico nacional sea más fácil. Sólo hay que multiplicar por diez mil la potencia de un aerogenerador para obtener la potencia instalada y, por tanto, también multiplicar por la misma cifra la energía que produce un aerogenerador para obtener la energía eólica total de la que se dispone para cubrir la demanda energética.

Tabla 3.2 .Estructura y evolución de la potencia instalada del régimen especial por tecnologías en GW [5]

Año/Energía	2006	2007	2008	2009	2010	%09/10
Renovables	14.26	18.02	21.96	25.27	27.24	7.80
Hidráulica	1.79	1.89	1.94	1.98	1.99	0.50
Eólica	11.52	14.67	16.15	18.96	20.06	5.80
Otras renovables	0.95	1.47	3.87	4.33	5.19	19.80
Biomasa	0.46	0.47	0.51	0.66	0.71	7.70
Solar fotovoltaica	0.14	0.65	2.96	3.05	3.46	13.30
Solar termoeléctrica	0.01	0.01	0.06	0.28	0.68	141.60
Resto de renovables	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00
No renovables	5.87	5.988	6.249	6.59	6.99	6,20
Calor residual	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.00
Carbón	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00
Fuel-Gasoil	0.92	0.92	0.92	0.93	0.94	1.40
Gas residual	0.13	0.13	0.13	0.16	0.16	0.00
Gas natural	4.71	4.83	5.08	5.39	5.78	7.30
Total	20.13	24.02	28.21	31.86	34.23	7.40

La Figura 3.3 muestra la característica potencia-viento de un aerogenerador de eje horizontal de 2 MW de potencia, teniendo como velocidad de arranque 4 m/s y como velocidad de corte 25 m/s.

El aerogenerador trabaja en condiciones nominales entre 12 m/s hasta la velocidad de corte. Y es con esta curva característica con la que se calcula, según la velocidad de viento prevista, la energía eólica prevista para un cierto periodo de tiempo [25].

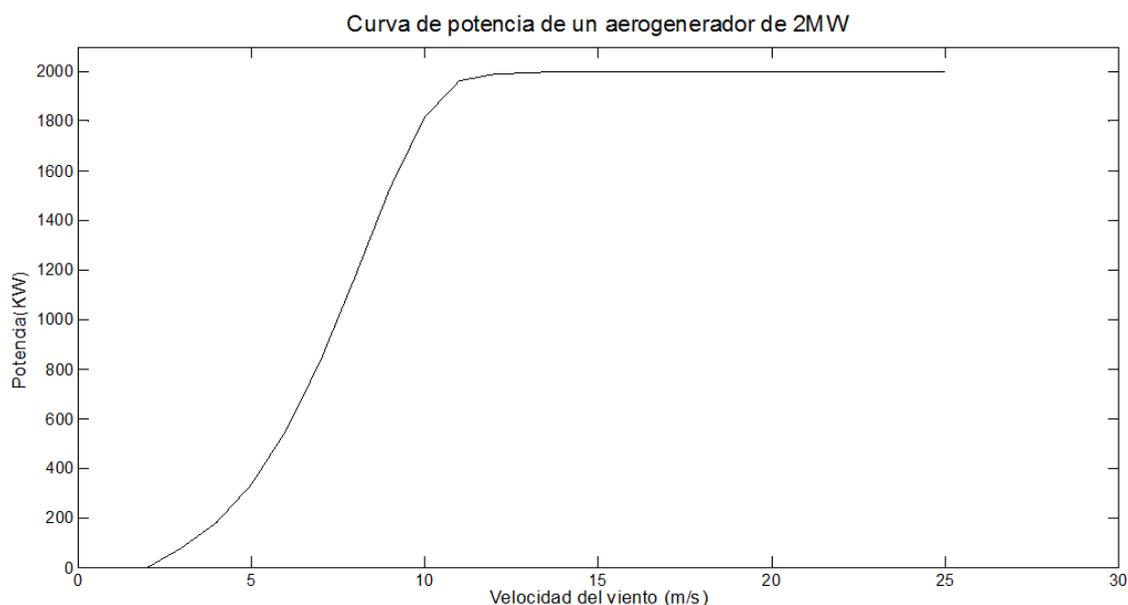


Figura 3.3. Curva Potencia-Velocidad del viento de un aerogenerador de 2MW [25].

Los puntos de la gráfica anterior son los de la Tabla 3.3, para velocidades intermedias se calculará la potencia a la que trabaja mediante una interpolación lineal entre los puntos colindantes.

Tabla 3.3. Característica Potencia-Velocidad del viento de un aerogenerador de 2MW [25].

V (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P (kW)	79	181	335	550	832	1175	1530	1816	1963	1988	1996	1999

Para velocidades que se encuentren entre 16 y 25 m/s la potencia que cede el aerogenerador es su potencia nominal, en este caso 2MW

3.2 Adecuación de los parámetros de entrada

Para llevar a cabo el cálculo de potencias, en primer lugar se ha de llevar la velocidad del viento medida a una altura de 10m o 20m, a la altura a la que se encuentra el eje del aerogenerador, en este caso 100m.

Para ello se utiliza la expresión,

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\alpha$$

Tomando α el valor de 0,35 ya que la orografía del terreno donde se implantan los aerogeneradores, exceptuando aquellos que se sitúan en el mar, es bastante accidentada, y, siguiendo los valores de la Tabla 2.2 de coeficientes de fricción, se concluye con que este valor es adecuado.

Una vez que se tiene el valor de α , se calculan las velocidades del viento, para ello se ha utilizado un programa en MATLAB, el cual recibe como entrada la velocidad del viento prevista de diez en diez minutos, y calcula la media de las seis medidas de cada hora una vez llevadas a la altura del eje del aerogenerador.

En este proyecto las velocidades de viento que se han utilizado son de una isla de Chile, isla de Sibaya, con valores de velocidades que pueden extrapolarse a la península ya que tienen latitudes similares en el plano terrestre.

Una vez obtenido el vector de velocidades medias por hora en la altura correspondiente, se ha de calcular la potencia que genera el aerogenerador para esas velocidades.

Para obtener la energía que genera por horas se utiliza la curva potencia- velocidad de un aerogenerador de 2MW, Figura 3.3, con los valores de la Tabla 3.3, y se hace una interpolación lineal para el cálculo de valores intermedios de velocidad. Esto también se realiza mediante un programa en MATLAB que, teniendo como entrada la curva característica del aerogenerador, los valores límites de velocidad del viento y las velocidades medias por hora, da como resultado la energía eólica que aporta dicho aerogenerador y se almacena en un archivo de texto que previamente se ha creado.

Una vez obtenidos los resultados de energía eólica prevista para dos días en intervalo de horario, se pueden introducir en el programa de optimización, para que, con el resto de energías utilizadas en el sistema, se casen de la manera más económica abasteciendo a la demanda.

Para que se optimice el abastecimiento de la demanda de forma económica, se ha de tener en cuenta los costes de generación de cada tipo de energía, en la Tabla 3.4 se muestra el coste por MWh de cada tipo de energía tratada.[16]

Tabla 3.4. Costes de cada tipo de energía [16]

Energía	Eólica	Térmica	Bombeo	Turbinada	Importación/Exportación
Coste(€/MWh)	60	50	0.167	30	61

Los costes del bombeo son tan bajos porque se consideran turbinas reversibles estando incluidos los costes de mantenimiento dentro de la parte de turbinado.

Los datos mostrados en la tabla anterior, que van a ser los que se van a utilizar en el proyecto, han sido calculados como media de los valores de la Tabla 3.5 aproximando a las unidades los resultados, ya que son datos que van a ir cambiando cada día dependiendo del mercado y son datos orientativos para penalizar la función objetivo. Lo importante es el orden de magnitud que tienen los valores y cuál es la relación que hay entre ellos.

Tabla 3.5. Costes de energías

Energía	Eólica	Térmica			Bombeo	Turbinada	Importación/ Exportación
		Nuclear	Carbón	Ciclo combinado			
Coste(€/MWh)	60	44.3	71.8	68.9	0.16	30-40	61

Las líneas de código utilizadas para calcular la velocidad media en el eje del aerogenerador a partir de las previsiones se encuentran en el ANEXO 1.

El código utilizado para el cálculo de la energía eólica generada a partir del viento se encuentra en el ANEXO 2.

3.3 Resultados

En este apartado, se exponen los dos grandes casos que se van a tratar, un primer caso muy simplificado, en el cual la energía eólica es un porcentaje fijo de la media de la demanda y no influye la velocidad del viento, y el segundo en el que entra en juego la variable viento, haciendo algo más real el problema.

Ambos casos serán optimizados con el programa informático de optimización GAMS, con el que se obtendrán los valores óptimos de cada tipo de energía que trata el sistema para casarla con la demanda.

Los resultados que obtiene GAMS han de ser tratados para poder manipularlos, y es por ello por lo que los exportamos a un documento EXCEL.

En este nuevo documento EXCEL se ponen los resultados en el formato que trabaja MATLAB, es decir, los números decimales tienen que llevar puntos en vez de comas. Después de haber moldeado los resultados y hacerlos legibles en MATLAB, se obtienen las gráficas de cada caso.

Los resultados del documento en EXCEL se pasan a formato legible para MATLAB porque los resultados que proporciona GAMS (pasados al documento EXCEL) no considera los valores nulos de las variables, es decir, si en la hora 5 la energía bombeada es nula, aparecerán los valores de la hora 4 y 6 siempre y cuando éstos no sean nulos, pero no el de la hora 5.

Así pues, para poder representar gráficamente los resultados, se tratan con un programa en MATLAB que rellena con ceros los valores que son nulos creando matrices para cada tipo de energía de las mismas dimensiones entre ellas. Haciendo posible la representación gráfica de los resultados.

El código del programa que realiza estas modificaciones para poder representar gráficamente los resultados se encuentra en el ANEXO 3.

El código del modelo programado en GAMS se encuentra adjunto en el ANEXO 4.

3.3.1 Caso 1.

El Caso 1, trata una gran simplificación del sistema eléctrico, considera la energía base y la energía eólica constante en función de un porcentaje de la media de la demanda.

Se puede considerar una de las siguientes opciones para obtener los valores de energía base y de energía eólica, bien se extraen en función de un porcentaje de la media de energía demandada diariamente o bien como porcentaje de la media de los puntos extremos de la energía demanda en un día.

Para analizar este caso se ha tenido en cuenta la primera opción, es decir, se ha calculado la media a los valores de la energía demandada de la Tabla 3.1, haciendo esto, se obtiene un valor de energía media demandada de 36.38 GWh.

Otra posible opción para tomar la base de energía térmica es la de fijar un porcentaje de la demanda, pero por horas. Si se hiciera esto, se tendría una potencia térmica y una potencia eólica diferente para cada hora que seguirían perfectamente la curva de demanda. Normalmente no suelen coincidir las horas de máxima producción de energía eólica con las horas de máxima demanda, por ello, es más coherente tomar una base fija.

Teniendo en cuenta lo anterior, la tabla de costes, y el rendimiento del proceso de bombeo y turbinado 64% del ciclo completo (80 % cada operación), se procede a modelar en GAMS el problema.

Una vez modelado el problema de optimización, se ejecuta y se extraen los resultados que serán exportados a EXCEL donde podrán ser tratados adecuadamente para su posterior representación.

1.1. Demanda cubierta con un 80% de energía base y un 20% de energía eólica en función de la media de la energía demandada y 3% de capacidad de interconexión.

En este apartado se tiene en cuenta la cobertura de la demanda con unos porcentajes fijos sobre la media de la misma del 80% (29.1GWh) para la energía de base y del 20% (7.28GWh) para la energía eólica.

Además de la energía de base y de la energía eólica que están fijadas por la media de la demanda, los valores de energía importada y exportada se ven limitados al 3% de la media de la energía demandada en un día.

Con todos estos datos y restricciones, aplicados al modelo en GAMS, se obtiene la Tabla 3.6 que muestra los resultados. En ella se puede observar en las dos últimas columnas en las horas de la primera a la quinta y de la vigésimo quinta a la vigésimo novena, una serie de valores que corresponden a la parte de demanda real y demanda que habría (o debería de haber) con estas condiciones, para que se cumplieran las restricciones del problema.

Estos valores señalados deberían de ser iguales unos a los otros, pero como la energía eólica es un porcentaje fijo de la media de la demanda, la energía que se puede bombear queda fijada por dicho valor afectado por el rendimiento, por ello, el balance de energía final no coincide con la demanda en aquellos momentos en los que es necesario bombear más del límite impuesto para que se cumpla la ecuación de balance de energías. El límite impuesto de forma indirecta es de 5.82GWh. En las horas en las que se turbinan y en aquellas en las cuales el bombeo es menor que el límite se cumple la igualdad.

Tabla 3.6. Resultados del problema de optimización obtenidos para el Caso 1.1

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)		HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)
0	5.82	0.00	5.82	0.44	0.00	31.00	31.00		24	27.95	0.00	5.82	0.44	0.00	31.00	31.00
1	11.64	0.00	5.82	0.00	1.09	27.50	29.46		25	33.77	0.00	5.82	0.00	1.09	27.50	29.46
2	17.46	0.00	5.82	0.00	1.09	25.50	29.46		26	39.59	0.00	5.82	0.00	1.09	25.50	29.46
3	23.28	0.00	5.82	0.00	1.09	24.50	29.46		27	45.41	0.00	5.82	0.00	1.09	24.50	29.46
4	29.10	0.00	5.82	0.00	1.09	25.00	29.46		28	51.23	0.00	5.82	0.00	1.09	25.00	29.46
5	34.92	0.00	5.82	0.00	1.09	27.50	29.46		29	57.05	0.00	5.82	0.00	1.09	27.50	29.46
6	37.88	0.00	2.96	1.09	0.00	34.50	34.50		30	60.02	0.00	2.96	1.09	0.00	34.50	34.50
7	35.65	2.23	0.00	1.09	0.00	39.70	39.70		31	57.78	2.23	0.00	1.09	0.00	39.70	39.70
8	31.61	4.03	0.00	1.09	0.00	41.50	41.50		32	53.75	4.03	0.00	1.09	0.00	41.50	41.50
9	27.08	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00		33	49.22	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00
10	22.55	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00		34	44.68	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00
11	17.01	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00		35	39.15	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00
12	14.48	2.53	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00		36	36.62	2.53	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00
13	12.45	2.03	0.00	1.09	0.00	39.50	39.50		37	34.58	2.03	0.00	1.09	0.00	39.50	39.50
14	8.91	3.53	0.00	1.09	0.00	41.00	41.00		38	31.05	3.53	0.00	1.09	0.00	41.00	41.00
15	6.91	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00		39	25.51	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00
16	14.70	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00		40	18.98	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00
17	8.16	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00		41	12.45	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00
18	10.45	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00		42	6.91	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00
19	7.91	2.53	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00		43	3.84	3.07	0.00	0.55	0.00	40.00	40.00
20	9.38	0.00	1.46	1.09	0.00	36.00	36.00		44	4.03	0.00	0.18	0.00	0.18	36.00	36.00
21	11.85	0.00	2.46	1.09	0.00	35.00	35.00		45	5.40	0.00	1.37	0.00	0.00	35.00	35.00
22	16.31	0.00	4.46	1.09	0.00	33.00	33.00		46	8.78	0.00	3.37	0.00	0.00	33.00	33.00
23	22.13	0.00	5.82	0.44	0.00	31.00	31.00		47	14.15	0.00	5.37	0.00	0.00	31.00	31.00

En la Tabla 3.6 la columna central HORAS engloba las primeras veinticuatro horas a la izquierda y las del siguiente día a la derecha. La columna de demanda sólo aparece en una columna porque la energía demandada en el primer día es la misma que la que se demanda en el segundo.

Otra observación que hay que tener en cuenta, es la verificación de la no linealidad del problema, al afirmarse que el producto de energía bombeada con la energía turbinada en cada hora da cero al igual que lo hace el producto de energía importada con energía exportada horariamente. Esto quiere decir, que en cada tramo horario, sólo se puede realizar una de las dos operaciones que aparece en cada ecuación, por tanto no se puede turbinar y bombear en la misma hora, como tampoco se puede importar y exportar energía al mismo tiempo.

Además, como se puede observar en la Tabla 3.7 de los resultados que ofrece GAMS, los valores que se resaltaron de la Tabla 3.6 que incumplían la ecuación de balance son los mismos que los que el programa reconoce y son aquellos en los que aparece las siglas INFES.

Tabla 3.7. Energía demandada (MWh) en cada hora obtenida en GAMS para el Caso 1.1

HORA	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
0	-5375.000	-5375.000	-5375.000	EPS	
1	-8875.000	-6911.250	-8875.000	-1.221E-4	INFES
2	-1.087E+	-6911.250	1.087E+4	-1.221E-4	INFES
3	-1.187E+4	-6911.250	-1.187E+4	-1.221E-4	INFES
4	-1.137E+4	-6911.250	-1.137E+4	-1.221E-4	INFES
5	-8875.000	-6911.250	-8875.000	-1.221E-4	INFES
6	-1875.000	-1875.000	-1875.000	1.2207E-4	
7	3325.000	3325.000	3325.000	1.2207E-4	
8	5125.000	5125.000	5125.000	1.2207E-4	
9	5625.000	5625.000	5625.000	1.2207E-4	
10	5625.000	5625.000	5625.000	1.2207E-4	
11	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
12	3625.000	3625.000	3625.000	1.2207E-4	
13	3125.000	3125.000	3125.000	1.2207E-4	
14	4625.000	4625.000	4625.000	1.2207E-4	
15	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
16	7625.000	7625.000	7625.000	1.2207E-4	
17	7625.000	7625.000	7625.000	1.2207E-4	
18	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
19	3625.000	3625.000	3625.000	1.2207E-4	
20	-375.000	-375.000	-375.000	1.2207E-4	

Mejora de la integración de la producción eólica en la red mediante incremento del almacenamiento y la capacidad de interconexión

21	-1375.000	-1375.000	-1375.000	1.2207E-4	
22	-3375.000	-3375.000	-3375.000	1.2207E-4	
23	-5375.000	-5375.000	-5375.000	EPS	
24	-5375.000	-5375.000	-5375.000	EPS	
25	-8875.000	-6911.250	-8875.000	-1.2207E-4	INFES
26	-1.087E+4	-6911.250	-1.087E+4	-1.2207E-4	INFES
27	-1.187E+4	-6911.250	-1.187E+4	-1.2207E-4	INFES
28	-1.137E+4	-6911.250	-1.137E+4	-1.2207E-4	INFES
29	-8875.000	-6911.250	-8875.000	-1.2207E-4	INFES
30	-1875.000	-1875.000	-1875.000	1.2207E-4	
31	3325.000	3325.000	3325.000	1.2207E-4	
32	5125.000	5125.000	5125.000	1.2207E-4	
33	5625.000	5625.000	5625.000	1.2207E-4	
34	5625.000	5625.000	5625.000	1.2207E-4	
35	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
36	3625.000	3625.000	3625.000	1.2207E-4	
37	3125.000	3125.000	3125.000	1.2207E-4	
38	4625.000	4625.000	4625.000	1.2207E-4	
39	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
40	7625.000	7625.000	7625.000	1.2207E-4	
41	7625.000	7625.000	7625.000	1.2207E-4	
42	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
43	3625.000	3625.000	3625.000	EPS	
44	-375.000	-375.000	-375.000	EPS	
45	-1375.000	-1375.000	-1375.000	EPS	
46	-3375.000	-3375.000	-3375.000	EPS	
47	-5375.000	-5375.000	-5375.000	EPS	

Una posible solución a este problema, con los mismos porcentajes de energía base y de energía eólica en función de la demanda, sería hacer posible que la energía bombeada no fuera sólo la excedente de la energía eólica, sino que pudiera tomar energía térmica si hubiera demasiado exceso de energía.

1.2. Demanda cubierta con un 80% de energía base y un 20% de energía eólica en función de la media de la energía demandada con 3% de capacidad de interconexión con el exterior y posibilidad de bombeo con el excedente de energía base y eólica.

Con los datos anteriormente definidos en el enunciado del apartado 1.2, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3.8 tras la simulación en GAMS.

Tabla 3.8. Resultados del problema de optimización obtenidos para el Caso 1.2

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)	HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)
0	6.18	0.00	6.18	0.81	0.00	31.00	31.00	24	15.51	0.00	4.28	0.00	1.09	31.00	31.00
1	15.07	0.00	8.88	0.01	0.00	27.50	27.50	25	23.30	0.00	7.78	0.00	1.09	27.50	27.50
2	25.96	0.00	10.88	0.01	0.00	25.50	25.50	26	33.08	0.00	9.78	0.00	1.09	25.50	25.50
3	37.85	0.00	11.88	0.01	0.00	24.50	24.50	27	43.87	0.00	10.78	0.00	1.09	24.50	24.50
4	49.24	0.00	11.38	0.01	0.00	25.00	25.00	28	54.15	0.00	10.28	0.00	1.09	25.00	25.00
5	58.13	0.00	8.88	0.01	0.00	27.50	27.50	29	61.93	0.00	7.78	0.00	1.09	27.50	27.50
6	60.02	0.00	1.88	0.01	0.00	34.50	34.50	30	62.72	0.00	0.78	0.00	1.09	34.50	34.50
7	57.78	2.23	0.00	1.09	0.00	39.70	39.70	31	60.24	2.47	0.00	0.84	0.00	39.70	39.70
8	53.75	4.03	0.00	1.09	0.00	41.50	41.50	32	55.96	4.27	0.00	0.84	0.00	41.50	41.50
9	49.22	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00	33	51.18	4.77	0.00	0.84	0.00	42.00	42.00
10	44.68	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00	34	46.40	4.77	0.00	0.84	0.00	42.00	42.00
11	39.15	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	35	40.62	5.77	0.00	0.84	0.00	43.00	43.00
12	36.62	2.53	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00	36	37.84	2.77	0.00	0.84	0.00	40.00	40.00
13	34.58	2.03	0.00	1.09	0.00	39.50	39.50	37	35.56	2.27	0.00	0.84	0.00	39.50	39.50
14	31.05	3.53	0.00	1.09	0.00	41.00	41.00	38	31.78	3.77	0.00	0.84	0.00	41.00	41.00
15	25.51	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	39	26.00	5.77	0.00	0.84	0.00	43.00	43.00
16	18.98	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00	40	19.23	6.77	0.00	0.84	0.00	44.00	44.00
17	12.45	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00	41	12.45	6.77	0.00	0.84	0.00	44.00	44.00
18	6.91	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	42	6.91	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00
19	4.38	2.53	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00	43	3.84	3.07	0.00	0.55	0.00	40.00	40.00
20	4.38	0.00	0.00	0.00	0.37	36.00	36.00	44	3.12	0.71	0.00	0.00	1.09	36.00	36.00
21	4.66	0.00	0.28	0.00	1.09	35.00	35.00	45	3.41	0.00	0.28	0.00	1.09	35.00	35.00
22	6.95	0.00	2.28	0.00	1.09	33.00	33.00	46	5.69	0.00	2.28	0.00	1.09	33.00	33.00
23	11.23	0.00	4.28	0.00	1.09	31.00	31.00	47	9.97	0.00	4.28	0.00	1.09	31.00	31.00

Como se puede observar en la Tabla 3.8, ahora los valores de la demanda y de la demanda que habría, coinciden, ya que el límite impuesto de forma indirecta es mucho mayor.

El valor de la función objetivo es en este caso es de 94.90 M€ este valor ha sido tomado del resultado que ofrece GAMS.

Con los resultados anteriores se extraen las representaciones gráficas Figura 3.4, Figura 3.5 y Figura 3.6, dónde se pueden ver de manera más clara las observaciones de no linealidad tanto en el bombeo y turbinado como en la importación y exportación y también se puede observar la evolución de la energía almacenada.

En la Figura 3.4, se representa la energía demandada como la curva continua que aparece, pudiendo observarse que la demanda del segundo día es la misma que la del primero, haciendo que la curva sea periódica de periodo un día.

En color verde se muestra la energía almacenada, que también evoluciona de manera casi periódica, ya que se almacena más energía en las horas valle mientras que en las horas punta se desembalsa esa energía previamente almacenada. Cabe destacar también que en la primera hora, la barra de la energía demandada es de color blanco indicando que es la energía almacenada inicial, en este caso con un valor de 10GWh.

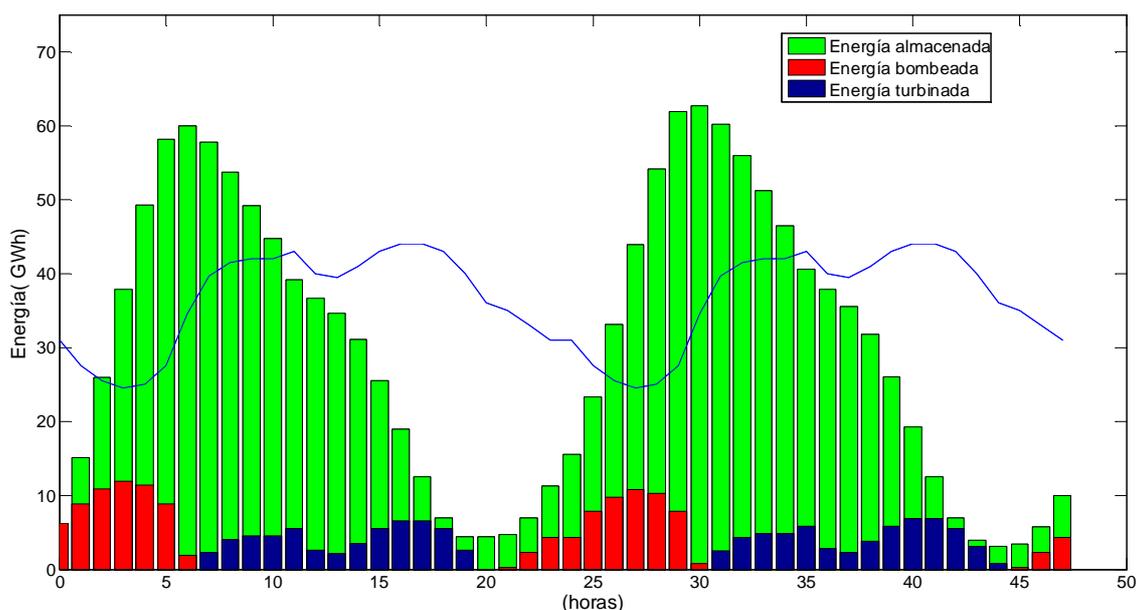


Figura 3.4. Energía demandada, energía almacenada, energía bombeada y turbinada en el Caso 1.2

Una de las observaciones que se mencionaron con anterioridad era la de la no linealidad que introducía la ecuación de la energía bombeada y la energía turbinada, pues esa no linealidad se puede ver en la Figura 3.4 de manera clara.

Las barras de color rojo hacen referencia a la energía que se ha bombeado y las barras de color azul se refieren a las horas en las que se turbinada energía. Como se puede observar, en ningún caso, aparece una barra roja con una azul en la misma hora, ya que solamente se puede realizar una de las dos acciones, o se turbinada o se bombea.

En la Figura 3.5, se muestra la otra no linealidad que se introduce en el problema, de la misma forma que afectaba en las energías turbinadas y bombeadas, aquí, en una misma hora, sólo se puede realizar una de las dos acciones disponibles, o se importa energía o se exporta.

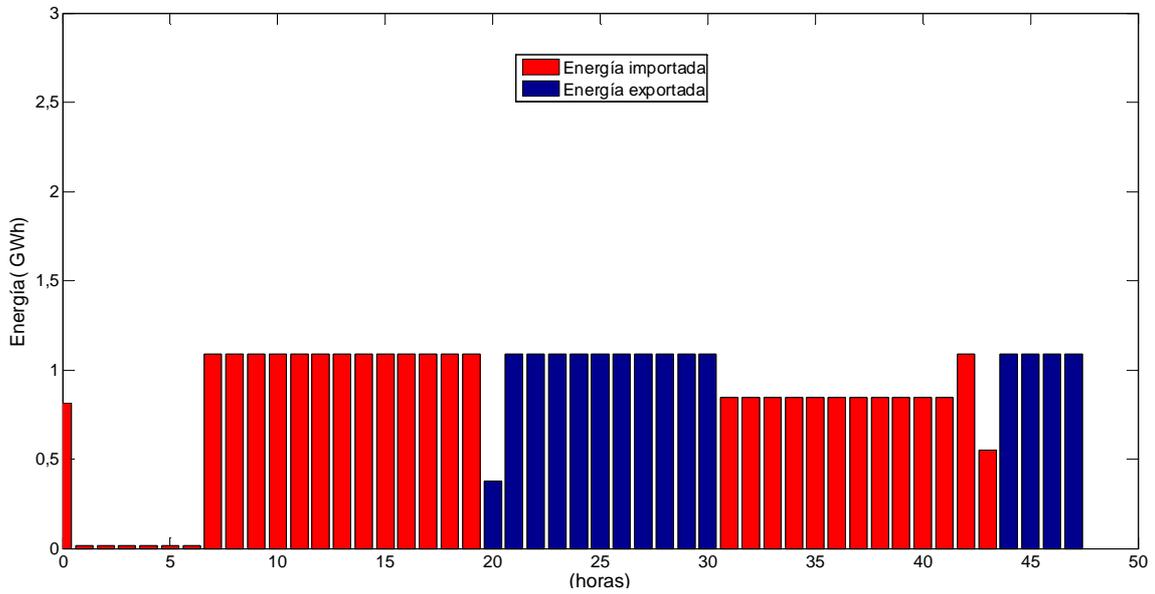


Figura 3.5. Energía importada y exportada en el Caso 1.2

También se puede hablar de la alternancia de colores según los periodos del día, esto se observa de una forma más clara en la Figura 3.6.

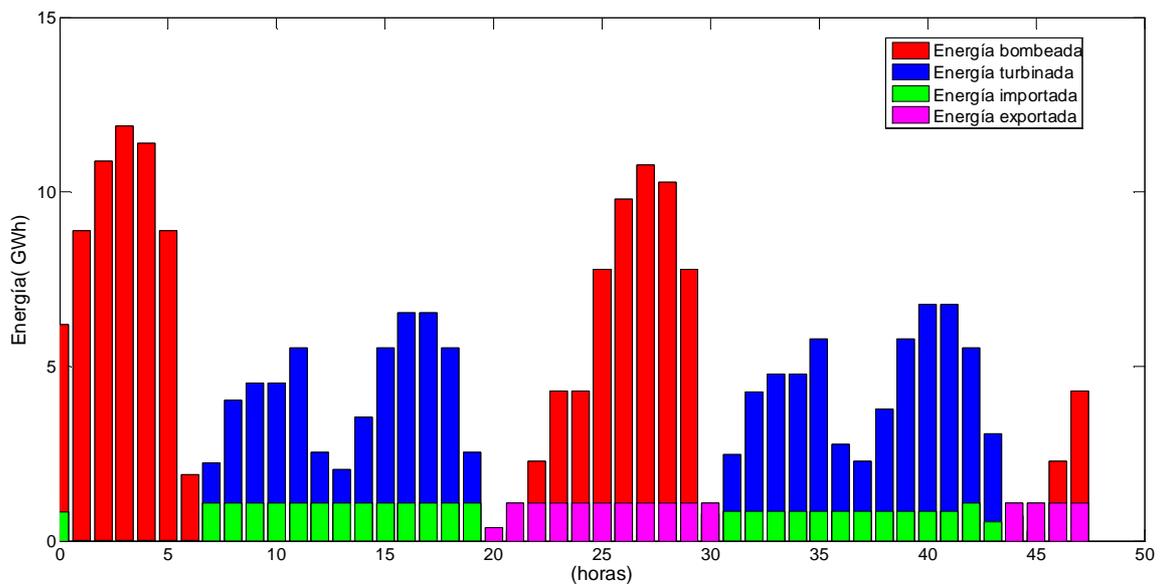


Figura 3.6. Energía bombeada, turbinada, importada y exportada en el Caso 1.2

De la Figura 3.6, cabe destacar la relación existente entre la energía bombeada y la exportada como la existente entre las energías turbinada e importada. Esta relación es consecuencia del exceso o defecto de energía existente para cubrir la demanda, es decir, si hay un exceso de energía, pues para optimizar el resultado, se venderá todo lo que sea posible y se almacenará el resto, del mismo modo, cuando se trata de un defecto de energía, se turbinará y se compra energía al exterior.

En el único tramo en el que esto no sucede es en las primeras horas, en el que se debería exportar energía, pero se observa que la importación es mínima.

1.3. Demanda cubierta con un 50% de energía base y un 50% de eólica con 3% de capacidad de interconexión con el exterior y energía bombeada en función de la energía eólica.

Este apartado trata de ver una evolución hacia el futuro haciendo que la energía base de España disminuya hasta el 50% y la energía eólica aumente hasta ese mismo porcentaje en función de la media de la energía demandada.

El que el porcentaje de la energía de base disminuya no quiere decir que se cierren centrales, que también podría pasar, sino que puede referirse a un gran aumento de la demanda y en vez de seguir construyendo centrales térmicas, construir más parques eólicos, por tanto, en función de la demanda que habría aumentado, el porcentaje de eólica aumenta porque se construyen más parques eólicos pero el porcentaje de energía térmica disminuye debido a lo contrario (o bien por cierre de algunas centrales térmicas existentes o bien porque se dejen de construir centrales térmicas).

La simulación del problema, con los datos comentados anteriormente y los límites de interconexión fijado en el 3%, da como resultados los que se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resultados del problema de optimización para el Caso 1.3

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)	HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)
0	6.18	0.00	6.18	0.81	0.00	31.00	31.00	24	15.51	0.00	4.28	0.00	1.09	31.00	31.00
1	15.07	0.00	8.88	0.01	0.00	27.50	27.50	25	23.30	0.00	7.78	0.00	1.09	27.50	27.50
2	25.96	0.00	10.88	0.01	0.00	25.50	25.50	26	33.08	0.00	9.78	0.00	1.09	25.50	25.50
3	37.85	0.00	11.88	0.01	0.00	24.50	24.50	27	43.87	0.00	10.78	0.00	1.09	24.50	24.50
4	49.24	0.00	11.38	0.01	0.00	25.00	25.00	28	54.15	0.00	10.28	0.00	1.09	25.00	25.00
5	58.13	0.00	8.88	0.01	0.00	27.50	27.50	29	61.93	0.00	7.78	0.00	1.09	27.50	27.50
6	60.02	0.00	1.88	0.01	0.00	34.50	34.50	30	62.72	0.00	0.78	0.00	1.09	34.50	34.50
7	57.78	2.23	0.00	1.09	0.00	39.70	39.70	31	60.24	2.47	0.00	0.84	0.00	39.70	39.70
8	53.75	4.03	0.00	1.09	0.00	41.50	41.50	32	55.96	4.27	0.00	0.84	0.00	41.50	41.50
9	49.22	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00	33	51.18	4.77	0.00	0.84	0.00	42.00	42.00
10	44.68	4.53	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00	34	46.40	4.77	0.00	0.84	0.00	42.00	42.00
11	39.15	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	35	40.62	5.77	0.00	0.84	0.00	43.00	43.00
12	36.62	2.53	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00	36	37.84	2.77	0.00	0.84	0.00	40.00	40.00
13	34.58	2.03	0.00	1.09	0.00	39.50	39.50	37	35.56	2.27	0.00	0.84	0.00	39.50	39.50
14	31.05	3.53	0.00	1.09	0.00	41.00	41.00	38	31.78	3.77	0.00	0.84	0.00	41.00	41.00
15	25.51	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	39	26.00	5.77	0.00	0.84	0.00	43.00	43.00
16	18.98	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00	40	19.23	6.77	0.00	0.84	0.00	44.00	44.00
17	12.45	6.53	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00	41	12.45	6.77	0.00	0.84	0.00	44.00	44.00
18	6.91	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	42	6.91	5.53	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00
19	4.38	2.53	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00	43	3.84	3.07	0.00	0.55	0.00	40.00	40.00
20	4.38	0.00	0.00	0.00	0.37	36.00	36.00	44	3.12	0.71	0.00	0.00	1.09	36.00	36.00
21	4.66	0.00	0.28	0.00	1.09	35.00	35.00	45	3.41	0.00	0.28	0.00	1.09	35.00	35.00
22	6.95	0.00	2.28	0.00	1.09	33.00	33.00	46	5.69	0.00	2.28	0.00	1.09	33.00	33.00
23	11.23	0.00	4.28	0.00	1.09	31.00	31.00	47	9.97	0.00	4.28	0.00	1.09	31.00	31.00

Con los resultados obtenidos en la Tabla 3.9, se puede construir una serie de gráficos que harán más visibles las conclusiones que se puedan extraer.

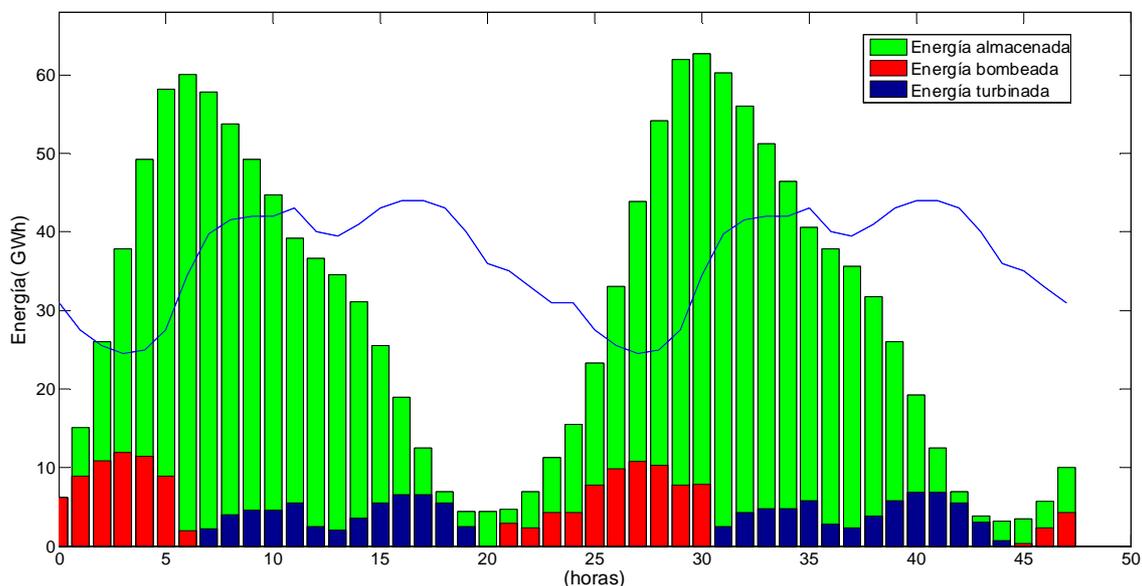


Figura 3.7. Energía demandada, energía almacenada, energía bombeada y turbinada en el Caso 1.3

Como se puede observar en la Figura 3.7, al aumentar la potencia eólica, los resultados extraídos son los mismos que los que se obtuvieron en el Caso 1.2 donde se podía bombear con parte de la energía térmica, esto sucede porque no se alcanza el límite en el bombeo ya que este sería de 14.55GWh, y el máximo que se alcanza es de unos 11.40GWh. Tomando valores la energía eólica mayores al 40% de la media de la demanda sale siempre el mismo resultado como se ha comprobado.

En este caso el valor de la función optimizada es de 100.14 M€, son seis millones de euros mayor que el Caso 1.2 cuando se podía bombear con el sobrante de energía térmica y eólica.

Por tanto, se va a proseguir con otra simulación con el 35% de la media de la demanda como energía eólica.

1.4. Demanda cubierta con un 65% de energía base y un 35% de eólica en base a la media de la energía demandada y un 3% de capacidad de interconexión exterior.

Como era de esperar, no se puede resolver por los mismos motivos que el primer caso, se llega a un momento en el cual la energía demandada debería ser mayor ya que se alcanza el límite de energía bombeada. Como se puede observar en la Tabla 3.10 vuelve a aparecer INFES.

Tabla 3.10 Energía demandada en cada hora obtenida en GAMS para el Caso 1.4

HORA	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
0	-5375.000	-5375.000	-5375.000	1.2207E-4	
1	-8875.000	-8875.000	-8875.000	1.2207E-4	
2	-1.087E+4	-1.087E+4	-1.087E+4	EPS	
3	-1.187E+4 4	-1.187E+4	-1.187E+4	-1.221E-4	INFES
4	-1.137E+4	-1.128E+4	-1.137E+4	-1.221E-4	INFES
5	-8875.000	-8875.000	-8875.000	1.221E-4	
6	-1875.000	-1875.000	-1875.000	1.2207E-4	
7	3325.000	3325.000	3325.000	1.2207E-4	
8	5125.000	5125.000	5125.000	1.2207E-4	
9	5625.000	5625.000	5625.000	1.2207E-4	
10	5625.000	5625.000	5625.000	1.2207E-4	
11	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
12	3625.000	3625.000	3625.000	1.2207E-4	
13	3125.000	3125.000	3125.000	1.2207E-4	
14	4625.000	4625.000	4625.000	1.2207E-4	
15	6625.000	6625.000	6625.000	1.2207E-4	
16	7625.000	7625.000	7625.000	1.2207E-4	
17	7625.000	7625.000	7625.000	1.2207E-4	
18	6625.000	6625.000	6625.000	2.7466E-4	
19	3625.000	3625.000	3625.000	EPS	
20	-375.000	-375.000	-375.000	EPS	
21	-1375.000	-1375.000	-1375.000	EPS	
22	-3375.000	-3375.000	-3375.000	EPS	
23	-5375.000	-5375.000	-5375.000	EPS	
24	-5375.000	-5375.000	-5375.000	EPS	
25	-8875.000	-8875.000	-8875.000	EPS	
26	-1.087E+4	-1.087E+4	-1.087E+4	EPS	

Mejora de la integración de la producción eólica en la red mediante incremento del almacenamiento y la capacidad de interconexión

27	-1.187E+4	-1.128E+4	-1.187E+4	-1.2207E-4	INFES
28	-1.137E+4	-1.128E	-1.137E+4	-1.2207E-4	INFES
29	-8875.000	-8875.000	-8875.000	-1.2207E-4	INFES
30	-1875.000	-1875.000	-1875.000	EPS	
31	3325.000	3325.000	3325.000	EPS	
32	5125.000	5125.000	5125.000	EPS	
33	5625.000	5625.000	5625.000	EPS	
34	5625.000	5625.000	5625.000	EPS	
35	6625.000	6625.000	6625.000	EPS	
36	3625.000	3625.000	3625.000	EPS	
37	3125.000	3125.000	3125.000	EPS	
38	4625.000	4625.000	4625.000	EPS	
39	6625.000	6625.000	6625.000	EPS	
40	7625.000	7625.000	7625.000	EPS	
41	7625.000	7625.000	7625.000	EPS	
42	6625.000	6625.000	6625.000	EPS	
43	3625.000	3625.000	3625.000	EPS	
44	-375.000	-375.000	-375.000	EPS	
45	-1375.000	-1375.000	-1375.000	EPS	
46	-3375.000	-3375.000	-3375.000	EPS	
47	-5375.000	-5375.000	-5375.000	EPS	

1.5. Demanda cubierta con un 50% de energía base y un 50% de eólica en base a la media de la energía demandada con un incremento del 3% en la capacidad de interconexión exterior.

Este apartado simula la situación donde el abastecimiento de la demanda se efectúa con un 50% de la media de la demanda en energía base, otro 50% con energía eólica y un incremento en la capacidad de interconexión exterior del 3% llegando hasta el 6%.

Con estos datos, se ejecuta del programa en GAMS y se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Resultados del problema de optimización para el Caso 1.5

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)	HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)
0	3.19	0.00	3.19	0.00	2.18	31.00	31.00	24	10.66	0.00	3.19	0.00	2.18	31.00	31.00
1	9.89	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50	25	17.36	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50
2	18.58	0.00	8.69	0.00	2.18	25.50	25.50	26	26.05	0.00	8.69	0.00	2.18	25.50	25.50
3	28.32	0.00	9.74	0.00	2.13	24.50	24.50	27	35.74	0.00	9.69	0.00	2.18	24.50	24.50
4	38.87	0.00	10.55	0.00	0.83	25.00	25.00	28	44.93	0.00	9.19	0.00	2.18	25.00	25.00
5	45.56	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50	29	51.63	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50
6	45.56	0.00	0.00	0.00	1.88	34.50	34.50	30	51.63	0.00	0.00	0.00	1.88	34.50	34.50
7	44.42	1.14	0.00	2.18	0.00	39.70	39.70	31	50.48	1.14	0.00	2.18	0.00	39.70	39.70
8	41.48	2.94	0.00	2.18	0.00	41.50	41.50	32	46.33	4.16	0.00	0.97	0.00	41.50	41.50
9	38.04	3.44	0.00	2.18	0.00	42.00	42.00	33	41.67	4.66	0.00	0.97	0.00	42.00	42.00
10	34.59	3.44	0.00	2.18	0.00	42.00	42.00	34	37.02	4.66	0.00	0.97	0.00	42.00	42.00
11	30.15	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00	35	31.36	5.66	0.00	0.97	0.00	43.00	43.00
12	28.71	1.44	0.00	2.18	0.00	40.00	40.00	36	29.92	1.44	0.00	2.18	0.00	40.00	40.00
13	27.77	0.94	0.00	2.18	0.00	39.50	39.50	37	28.98	0.94	0.00	2.18	0.00	39.50	39.50
14	25.32	2.44	0.00	2.18	0.00	41.00	41.00	38	26.54	2.44	0.00	2.18	0.00	41.00	41.00
15	20.88	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00	39	22.09	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00
16	15.44	5.44	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00	40	15.44	6.66	0.00	0.97	0.00	44.00	44.00
17	10.00	5.44	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00	41	10.00	5.44	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00
18	5.55	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00	42	5.55	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00
19	3.09	2.47	0.00	1.16	0.00	40.00	40.00	43	3.09	2.47	0.00	1.16	0.00	40.00	40.00
20	3.09	0.00	0.00	0.00	0.38	36.00	36.00	44	1.71	1.37	0.00	0.00	1.75	36.00	36.00
21	3.09	0.00	0.00	0.00	1.38	35.00	35.00	45	0.95	0.76	0.00	0.00	2.14	35.00	35.00
22	4.28	0.00	1.19	0.00	2.18	33.00	33.00	46	2.15	0.00	1.19	0.00	2.18	33.00	33.00
23	7.47	0.00	3.19	0.00	2.18	31.00	31.00	47	5.34	0.00	3.19	0.00	2.18	31.00	31.00

El valor de la función objetivo es de 99.19 M€ es decir, que con las mismas condiciones que el Caso 1.3, sólo aumentando la interconexión un 3%, se disminuyen los costes un millón de euros.

Estos resultados numéricos se pueden representar en forma gráfica como en los casos anteriores para poder extraer de forma más clara las conclusiones.

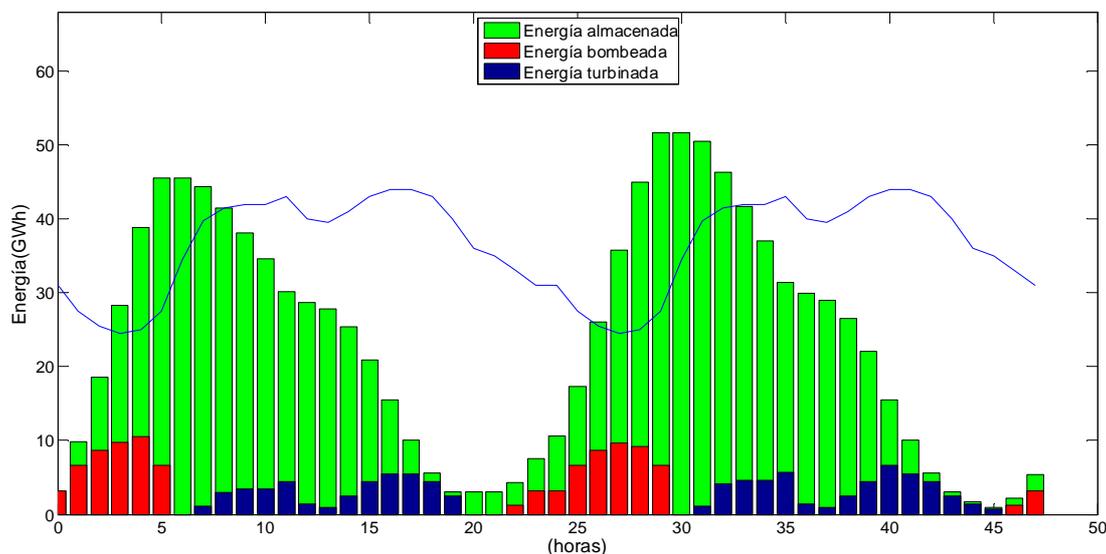


Figura 3.8. . Energía demandada, energía almacenada, energía bombeada y turbinada en el Caso 1.5

Como se puede observar en la Figura 3.8, también existen horas en las que no se turбина ni se bombea nada, es decir que la demanda se cubre con la energía térmica, eólica y con la importación de energía si fuera necesario.

También se puede observar lo ya comentado en los casos anteriores, siempre se cumple la restricción de la no linealidad, tanto con las energías bombeada-turbinada como con las importada-exportada.

La primera conclusión que se extrae del aumento de la capacidad de interconexión es que la energía que hay que almacenar es menor que cuando era sólo del 3%. Se pasa de tener el máximo en los 60GW a unos 50GW aumentando 1.1GW la potencia de interconexión.

En la Figura 3.9 se vuelve a observar lo ya comentado en los casos anteriores, además de confirmarse de nuevo la no linealidad, se utiliza energía para el bombeo cuando hay exceso de ésta, y por tanto también coincide con los periodos de exportación. Del mismo modo, cuando hay déficit de energía se pasa del bombeo al turbinado y de la exportación a la importación.

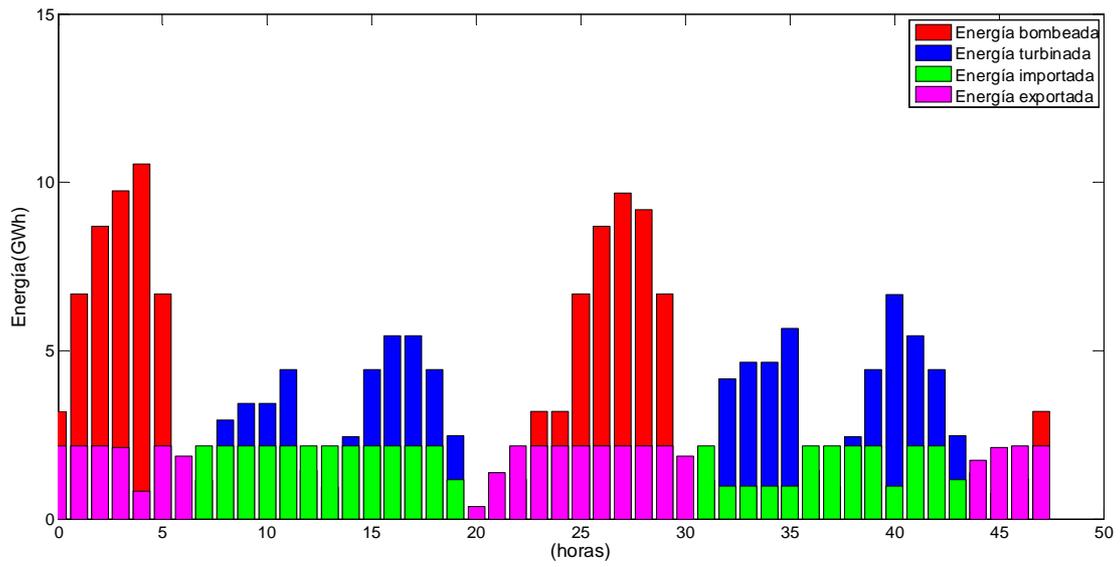


Figura 3.9. Bombeo, turbinado, importación y exportación Caso 1.5

1.6. Demanda cubierta con un 80% de energía base y un 20% de eólica en base a la media de la energía demandada con un incremento del 3% en la capacidad de interconexión exterior.

Con los datos mencionados en el título del apartado, se realiza la simulación en GAMS. Tras la simulación obtenemos los resultados que están en la Tabla 3.12. El valor de la función objetivo en este caso es de 93.95 M€.

Tabla 3.12. Resultados del problema de optimización para el Caso 1.6.

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)		HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)
0	3.19	0.00	3.19	0.00	2.18	31.00	31.00		24	10.66	0.00	3.19	0.00	2.18	31.00	31.00
1	9.89	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50		25	17.36	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50
2	18.58	0.00	8.69	0.00	2.18	25.50	25.50		26	26.05	0.00	8.69	0.00	2.18	25.50	25.50
3	28.32	0.00	9.74	0.00	2.13	24.50	24.50		27	35.74	0.00	9.69	0.00	2.18	24.50	24.50
4	38.87	0.00	10.55	0.00	0.83	25.00	25.00		28	44.93	0.00	9.19	0.00	2.18	25.00	25.00
5	45.56	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50		29	51.63	0.00	6.69	0.00	2.18	27.50	27.50
6	45.56	0.00	0.00	0.00	1.88	34.50	34.50		30	51.63	0.00	0.00	0.00	1.88	34.50	34.50
7	44.42	1.14	0.00	2.18	0.00	39.70	39.70		31	50.48	1.14	0.00	2.18	0.00	39.70	39.70
8	41.48	2.94	0.00	2.18	0.00	41.50	41.50		32	46.33	4.16	0.00	0.97	0.00	41.50	41.50
9	38.04	3.44	0.00	2.18	0.00	42.00	42.00		33	41.67	4.66	0.00	0.97	0.00	42.00	42.00
10	34.59	3.44	0.00	2.18	0.00	42.00	42.00		34	37.02	4.66	0.00	0.97	0.00	42.00	42.00
11	30.15	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00		35	31.36	5.66	0.00	0.97	0.00	43.00	43.00
12	28.71	1.44	0.00	2.18	0.00	40.00	40.00		36	29.92	1.44	0.00	2.18	0.00	40.00	40.00
13	27.77	0.94	0.00	2.18	0.00	39.50	39.50		37	28.98	0.94	0.00	2.18	0.00	39.50	39.50
14	25.32	2.44	0.00	2.18	0.00	41.00	41.00		38	26.54	2.44	0.00	2.18	0.00	41.00	41.00
15	20.88	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00		39	22.09	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00
16	15.44	5.44	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00		40	15.44	6.66	0.00	0.97	0.00	44.00	44.00
17	10.00	5.44	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00		41	10.00	5.44	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00
18	5.55	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00		42	5.55	4.44	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00
19	3.09	2.47	0.00	1.16	0.00	40.00	40.00		43	3.09	2.47	0.00	1.16	0.00	40.00	40.00
20	3.09	0.00	0.00	0.00	0.38	36.00	36.00		44	1.71	1.37	0.00	0.00	1.75	36.00	36.00
21	3.09	0.00	0.00	0.00	1.38	35.00	35.00		45	0.95	0.76	0.00	0.00	2.14	35.00	35.00
22	4.28	0.00	1.19	0.00	2.18	33.00	33.00		46	2.15	0.00	1.19	0.00	2.18	33.00	33.00
23	7.47	0.00	3.19	0.00	2.18	31.00	31.00		47	5.337	0	3.193	0	2.18	31.00	31.00

Los resultados de la solución óptima mostrados en la Tabla 3.12 se pueden representar de forma gráfica para su mejor interpretación.

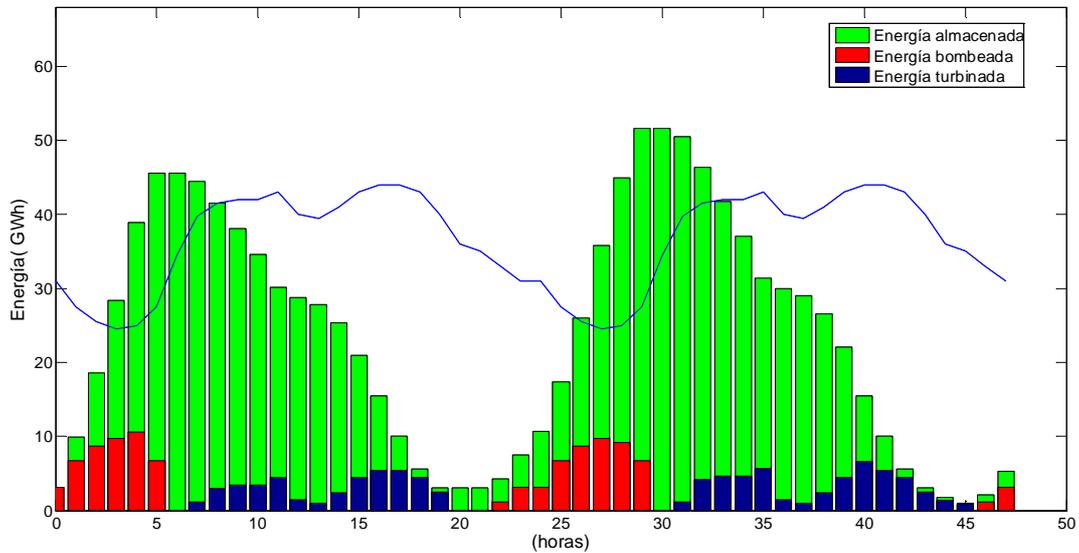


Figura 3.10. Energía demandada, energía almacenada, energía bombeada y turbinada en el Caso 1.6

En la Figura 3.10 se representa la energía demandada, la almacenada junto con la energía bombeada y turbinada, como se puede observar la energía almacenada es casi periódica y cuando más cantidad de energía se almacena es en los periodos de valle.

Además el embalse vaciaría todos los días casi al completo.

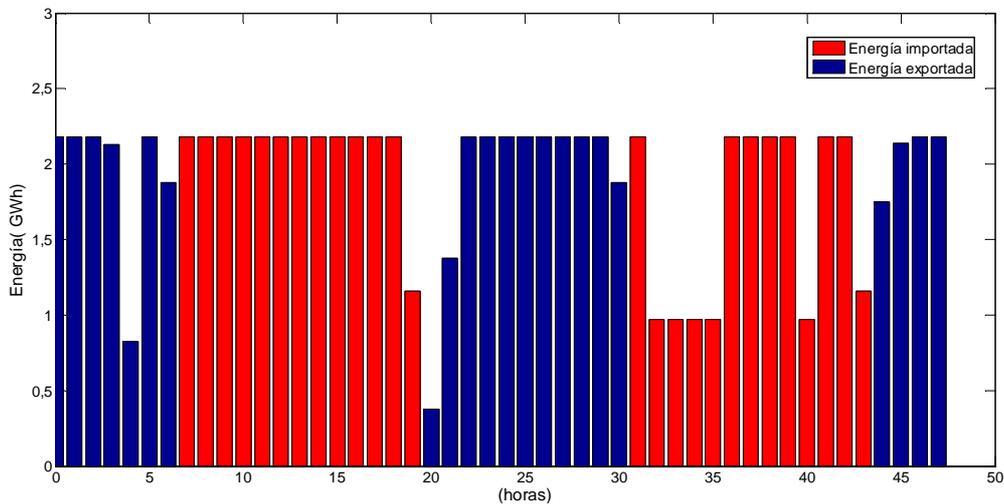


Figura 3.11. Resultados de la interconexión en el Caso 1.6

En la Figura 3.11 se muestra la interconexión con el exterior como solución al problema tratado. En esta ocasión no se ha representado conjuntamente con la energía bombeada y la turbinada porque unas columnas tapaban a otras en el gráfico.

3.3.2 Caso 2.

El Caso 2 no deja de tratarse de una simplificación del sistema eléctrico, ya que además de considerar la potencia base constante, en función de un porcentaje de la media de energía demandada, también se va a considerar el sistema sin pérdidas, donde el circuito hidráulico no tiene fugas ni variaciones del volumen del agua por caudales naturales, es decir, que se trata de un sistema cerrado donde siempre recircula el mismo agua. Pero el Caso 2 es más real que el Caso 1 porque tiene en cuenta la velocidad del viento, por tanto, la energía eólica que el parque eólico genera está función de la velocidad del viento.

Para realizar este apartado, se ha calculado la media a los valores de la demanda de la Tabla 3.1, y haciendo esto, se obtiene un valor de energía media demandada de 36.38 GWh que van a ser los que se van a utilizar en el porcentaje de la energía base.

El Caso 2 trata dos situaciones muy diferentes una de la otra, una en la cual se toma dos días de verano y la otra en la que los dos días que se analizan son de invierno en ambas situaciones la velocidad del viento es muy diferente y, por tanto, la generación de energía eólica va a variar bastante de un caso al otro.

Teniendo en cuenta lo anterior, la tabla de costes, y el rendimiento del proceso de bombeo y turbinado 64%, un 80 % cada operación, se procede a modelar en GAMS el problema. El modelo programado en GAMS se encuentra adjunto en el ANEXO 4.

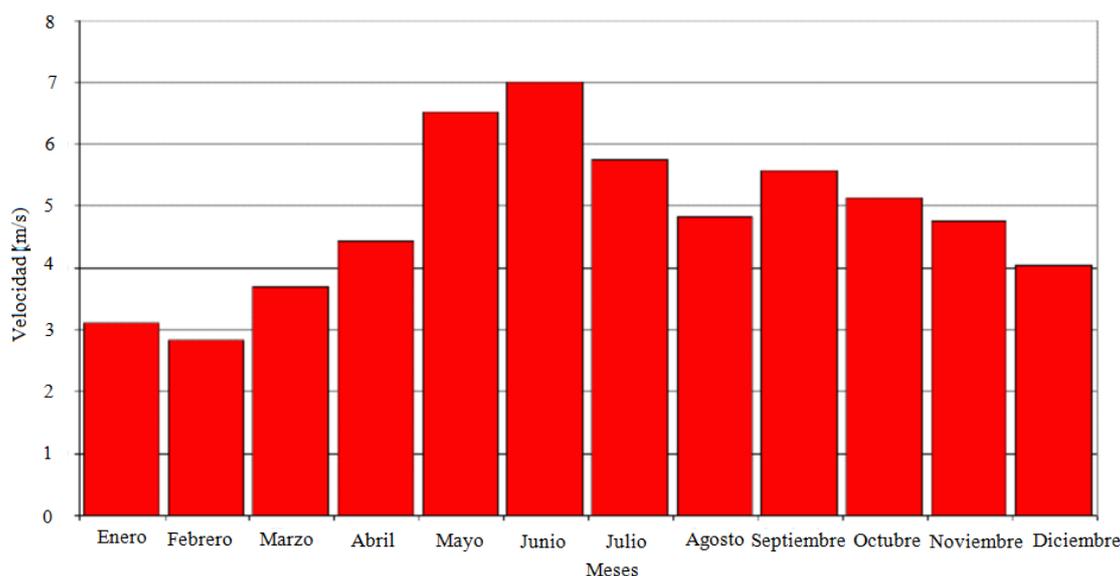


Figura 3.12. Promedio de velocidades del viento en la isla de Sibaya año 2004[22]

Teniendo en cuenta la Figura 3.12, es más fácil ver en qué meses del año existe mayor diferencia de velocidad del viento. Los primeros días que se van a tener en cuenta en este trabajo van a ser el 1 y 2 de Enero del año 2004, y para el segundo caso, los días 2 y 3 de Junio del año 2004, también hay que tener en cuenta que cuando en España es verano en Chile es invierno y viceversa.

En base a esto, se adaptan las velocidades medidas a una altura de 20 metros, y se pasan a una altura de 100 m, que es dónde se sitúa el eje del aerogenerador.

Una vez obtenidas las velocidades, se calcula la potencia disponible que hay en función de la velocidad del viento, teniendo en cuenta la curva de potencia del aerogenerador. Figura 3.3.

Con la curva de potencia eólica en intervalos horarios, se calcula la energía eólica de la que se va a disponer, que junto con las interconexiones con el exterior y con la energía de base tienen que cubrir la demanda, bombeando el excedente de energía y turbinando cuando hay déficit de la misma.

En las siguientes tablas, Tabla 3.13 y Tabla 3.14, se muestran la velocidad del viento y la potencia que genera por cada hora para los dos días tenidos en cuenta.

Además, en las Figura 3.13 y Figura 3.14, se representa de manera gráfica los valores numéricos de las tablas citadas, pudiéndose visualizar de manera más clara cuál es el comportamiento del viento en los días considerados y, por tanto, cuál es la evolución de la energía eólica producida.

Tabla 3.13. Energía eólica generada y velocidad del viento de los días 1 y 2 de Enero de 2004

Hora	Vel. Viento (m/s)	Energía (GWh)	Hora	Vel. Viento (m/s)	Energía (GWh)	Hora	Vel. Viento (m/s)	Energía (GWh)	Hora	Vel. Viento (m/s)	Energía (GWh)
0	2.48	0.00	12	11.76	19.28	24	6.17	3.73	36	8.37	9.59
1	4.88	1.69	13	9.22	12.53	25	5.26	2.22	37	8.57	10.30
2	3.10	0.00	14	10.07	15.50	26	5.35	2.36	38	13.58	19.92
3	3.95	0.00	15	9.48	13.47	27	5.76	2.99	39	13.05	19.88
4	6.00	3.35	16	7.17	5.98	28	4.65	1.45	40	12.26	19.69
5	6.93	5.36	17	7.58	7.14	29	3.83	0.00	41	14.34	19.97
6	5.85	3.12	18	7.49	6.89	30	2.66	0.00	42	12.32	19.71
7	7.08	5.73	19	8.25	9.19	31	3.39	0.00	43	11.70	19.20
8	7.64	7.30	20	6.55	4.54	32	5.12	1.99	44	14.43	19.97
9	7.64	7.30	21	6.85	5.17	33	6.32	4.04	45	11.91	19.50
10	13.20	19.89	22	5.35	2.36	34	6.73	4.92	46	7.34	6.48
11	14.02	19.96	23	6.41	4.23	35	7.72	7.55	47	3.132	0.00

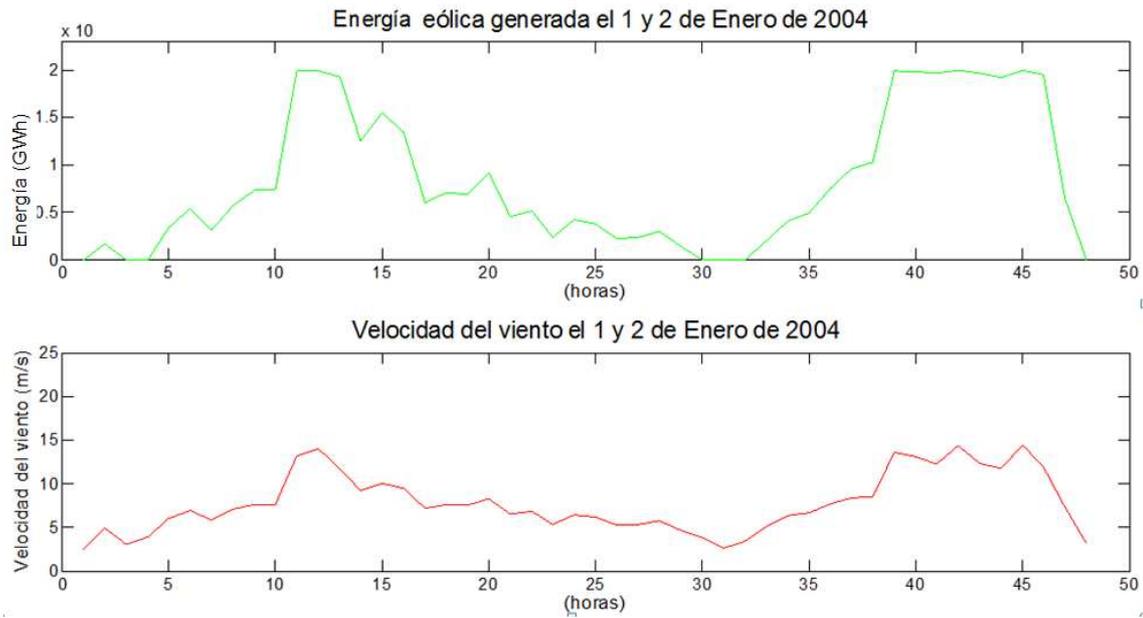


Figura 3.13. Energía eólica generada y velocidad del viento de los día 1 y 2 de Enero de 2004

Tabla 3.14. Energía eólica generada y velocidad del viento del día 2 y 3 de Junio de 2004

Hora	Vel.Viento (m/s)	Energía (GWh)									
0	16.65	20.00	12	7.20	6.06	24	18.35	20.00	36	8.66	10.60
1	17.82	20.00	13	7.90	8.04	25	18.99	20.00	37	8.40	9.69
2	18.15	20.00	14	9.39	13.19	26	19.23	20.00	38	8.84	11.20
3	18.88	20.00	15	9.33	12.95	27	19.17	20.00	39	9.04	11.91
4	19.93	20.00	16	9.89	14.92	28	18.96	20.00	40	8.31	9.39
5	19.70	20.00	17	7.84	7.88	29	18.94	20.00	41	6.05	3.47
6	19.20	20.00	18	3.77	0.00	30	17.71	20.00	42	3.13	0.00
7	19.55	20.00	19	1.90	0.00	31	17.38	20.00	43	2.42	0.00
8	19.35	20.00	20	10.89	17.84	32	17.53	20.00	44	14.25	19.96
9	16.59	20.00	21	16.13	20.00	33	13.11	19.88	45	15.89	19.99
10	5.26	2.22	22	16.30	20.00	34	5.29	2.26	46	15.92	19.99
11	5.53	2.63	23	17.85	20.00	35	7.46	6.81	47	16.36	20.00

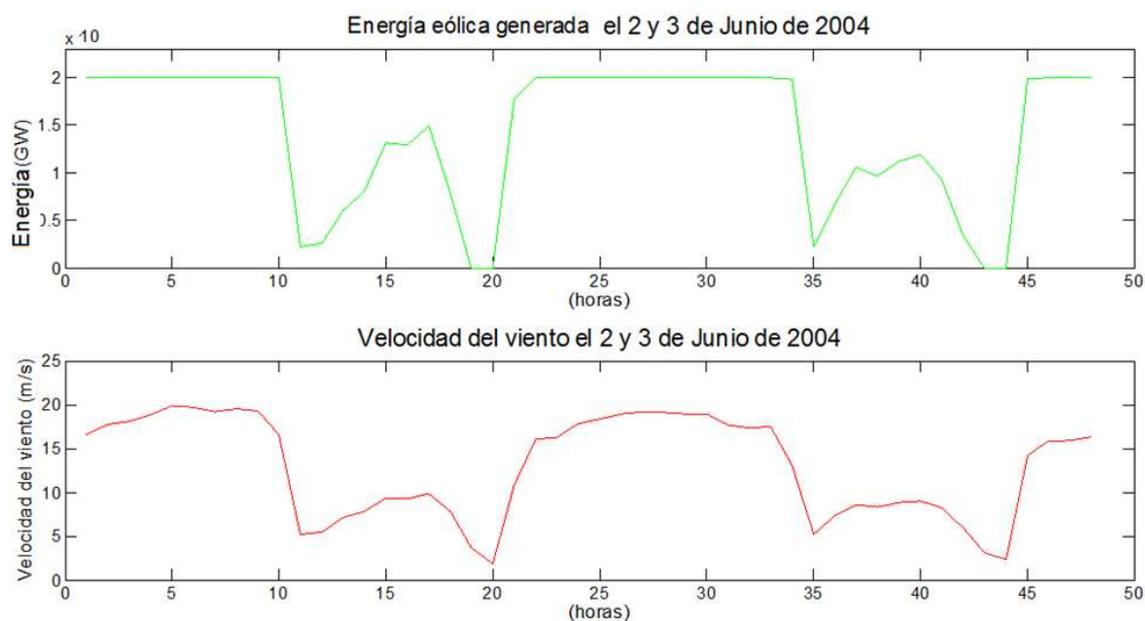


Figura 3.14. Energía eólica generada y velocidad del viento de los día 2 y 3 de Junio de 2004

Al comparar las Figuras 3.13 y Figura 3.14 se puede decir que en Enero (verano en Chile) los vientos son mas variables que en Junio (invierno en Chile) pero los cambios que existen son más bruscos. La evolución del viento es más periódica en invierno que en verano y hay un mayor número de horas en las que la potencia que ceden los aerogeneradores es máxima.

2.1. Demanda cubierta con un 80% de la media de la demanda en energía base, un límite en las interconexiones del 3% y la energía eólica en función del viento en Enero del año 2004.

Tras la ejecución de la simulación en el programa de optimización GAMS, se obtiene unos resultados que no son compatibles, como también pasaba en algún caso anterior, apareciendo la palabra INFES.

En los casos anteriores aparecía esta incompatibilidad de resultados porque se imponía un límite de manera indirecta a la energía bombeada, ya que la energía eólica era constante. Ahora, pasa lo mismo pero hora a hora, es decir, no se puede bombear más de lo que la energía eólica aporta, afectada por el rendimiento. Por tanto, puede haber horas, como se da en este caso, en las que la energía eólica es insuficiente para poder bombear toda la energía que hay en exceso, una vez ya se ha vendido toda la que se podía.

Tabla 3.15. Energía demandada en cada hora obtenida en GAMS para el Caso 2.1

HORA	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
0	1900.000	1900.000	1900.000	1.2207E-4	
1	-3296.604	-2182.283	-3296.604	-4.883E-4	INFES
2	-3600.000	-765.000	-3600.000	-4.883E-4	INFES
3	-4600.000	-735.000	-4600.000	-4.883E-4	INFES
4	-7452.699	-3432.159	-7452.699	-2.441E-4	INFES
5	-6966.779	-5118.423	-6966.779	-2.441E-4	INFES
6	2273.480	2273.480	2273.480	1.2207E-4	
7	4861.967	4861.967	4861.967	1.2207E-4	
8	5093.444	5093.444	5093.444	1.2207E-4	
9	5593.444	5593.444	5593.444	1.2207E-4	
10	6996.221	6996.221	6996.221	1.2207E-4	
11	-6060.673	-6060.673	-6060.673	1.2207E-4	
12	-8389.424	-8389.424	-8389.424	1.2207E-4	
13	-2136.117	-2136.117	-2136.117	1.2207E-4	
14	-3601.342	-3601.342	-3601.342	1.2207E-4	
15	428.566	428.566	428.566	1.2207E-4	
16	8914.305	8914.305	8914.305	1.2207E-4	
17	7758.551	7758.551	7758.551	1.2207E-4	
18	7006.213	7006.213	7006.213	1.2207E-4	
19	1704.028	1704.028	1704.028	1.2207E-4	
20	2351.441	2351.441	2351.441	1.2207E-4	
21	722.041	722.041	722.041	1.2207E-4	
22	1539.884	1539.884	1539.884	1.2207E-4	
23	-2333.859	-2333.859	-2333.859	1.2207E-4	
24	-1830.339	-1830.339	-1830.339	1.2207E-4	
25	-3824.868	-2604.895	-3824.868	-4.883E-4	INFES
26	-5960.116	-2653.093	-5960.116	-2.441E-4	INFES
27	-7591.273	-3128.018	-7591.273	-2.441E-4	INFES
28	-5557.725	-1916.180	-5557.725	-2.441E-4	INFES
29	-1600.000	-825.000	-1600.000	-9.766E-4	INFES
30	5400.000	5400.000	5400.000	1.2207E-4	
31	10600.000	10600.000	10600.000	1.2207E-4	
32	10400.545	10400.545	10400.545	1.2207E-4	
33	8854.961	8854.961	8854.961	1.2207E-4	
34	7973.801	7973.801	7973.801	1.2207E-4	
35	6345.782	6345.782	6345.782	2.7466E-4	

Mejora de la integración de la producción eólica en la red mediante incremento del almacenamiento y la capacidad de interconexión

36	1302.383	1302.383	1302.383	EPS
37	99.504	99.504	99.504	EPS
38	-8026.666	-8026.666	-8026.666	EPS
39	-5984.511	-5984.511	-5984.511	EPS
40	-4796.495	-4796.495	-4796.495	EPS
41	-5070.334	-5070.334	-5070.334	EPS
42	-5811.132	-5811.132	-5811.132	EPS
43	-8303.357	-8303.357	-8303.357	EPS
44	-1.307E+4	-1.307E+4	-1.307E+4	EPS
45	-1.360E+4	-1.360E+4	-1.360E+4	EPS
46	-2581.018	-2581.018	-2581.018	EPS
47	1900.000	1900.000	1900.000	EPS

Así pues, se plantean dos posibles soluciones, una ya tomada en casos anteriores y otra nueva, la primera de ellas es permitir que el bombeo pueda venir tanto del exceso de energía eólica como de la energía de base y el segundo de ellos es aumentar la interconexión con el exterior para poder exportar toda aquella energía sobrante que no sería capaz de bombear por defecto de energía eólica.

Con los datos de viento de este día y, por tanto, con los datos de energía eólica generada en este día, se tendría que multiplicar por 6 la capacidad de las líneas de interconexión con el exterior, ya que, hasta que hasta que no se llega al 20% de interconexión no dejan de aparecer incompatibilidades.

Aumentar tanto la capacidad de interconexión es prácticamente imposible, por ello, sólo se va a analizar el primero de los dos casos mencionados, en el cual se admite en el bombeo el uso del excedente de energía eólica y de la energía base.

2.2. Demanda cubierta con un 80% de la media de la demanda en energía base, límite de 3% en las interconexiones y la energía eólica en función del viento en Enero del año 2004.

Con el problema planteado, cobertura de la demanda con un 80% de la media de la demanda en energía base, un límite de un 3% en las interconexiones exteriores y pudiendo bombearse el excedente de energía eólica y de energía de base, no se encuentra una solución viable por los mismos motivos que se comentaron con anterioridad, debido a la fluctuabilidad de la energía eólica, se da el caso en el cual, la energía eólica producida junto con la importada y la de base, no alcanza la demandada en alguna hora, por ello se ha aumentado el porcentaje del 80 al 83% de la media de la demanda para la energía de base. Con este nuevo valor, sí se consigue unos resultados viables, y éstos son los que se muestran en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Resultados del problema de optimización para el Caso 2.2

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)	HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)
0	3.30	0.00	0.00	0.81	0.00	31.00	31.00	24	26.43	0.00	1.83	0.00	1.09	31.00	31.00
1	6.90	0.00	3.30	0.00	1.09	27.50	27.50	25	32.39	0.00	3.83	0.00	1.09	27.50	27.50
2	11.50	0.00	3.60	0.00	1.09	25.50	25.50	26	39.98	0.00	5.96	0.00	1.09	25.50	25.50
3	18.95	0.00	4.60	0.00	1.09	24.50	24.50	27	45.54	0.00	7.59	0.00	1.09	24.50	24.50
4	25.92	0.00	7.45	0.00	1.09	25.00	25.00	28	47.14	0.00	5.56	0.00	1.09	25.00	25.00
5	24.73	0.00	6.97	0.00	1.09	27.50	27.50	29	42.83	0.00	1.60	0.00	1.09	27.50	27.50
6	20.96	1.18	0.00	0.00	0.00	34.50	34.50	30	33.32	4.31	0.00	0.00	0.00	34.50	34.50
7	16.96	3.77	0.00	0.00	0.00	39.70	39.70	31	24.01	9.51	0.00	0.00	0.00	39.70	39.70
8	12.46	4.00	0.00	0.00	0.00	41.50	41.50	32	16.25	9.31	0.00	0.00	0.00	41.50	41.50
9	19.46	4.50	0.00	0.00	0.00	42.00	42.00	33	9.37	7.76	0.00	0.00	0.00	42.00	42.00
10	25.52	0.00	7.00	0.00	1.09	42.00	42.00	34	5.20	6.88	0.00	0.00	0.00	42.00	42.00
11	33.91	0.00	6.06	0.00	1.09	43.00	43.00	35	3.90	4.16	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00
12	36.04	0.00	8.39	0.00	1.09	40.00	40.00	36	3.80	1.30	0.00	0.00	1.09	40.00	40.00
13	39.64	0.00	2.14	0.00	1.09	39.50	39.50	37	11.83	0.10	0.00	0.00	1.09	39.50	39.50
14	39.64	0.00	3.60	0.00	1.09	41.00	41.00	38	17.81	0.00	8.03	0.00	1.09	41.00	41.00
15	32.29	0.00	0.00	0.00	0.66	43.00	43.00	39	22.61	0.00	5.99	0.00	1.09	43.00	43.00
16	25.62	7.36	0.00	0.47	0.00	44.00	44.00	40	27.68	0.00	4.80	0.00	1.09	44.00	44.00
17	19.70	6.67	0.00	0.00	0.00	44.00	44.00	41	33.49	0.00	5.07	0.00	1.09	44.00	44.00
18	19.70	5.92	0.00	0.00	0.00	43.00	43.00	42	41.80	0.00	5.81	0.00	1.09	43.00	43.00
19	18.44	0.00	0.00	0.61	0.00	40.00	40.00	43	54.87	0.00	8.30	0.00	1.09	40.00	40.00
20	18.44	1.26	0.00	0.00	0.00	36.00	36.00	44	68.47	0.00	13.07	0.00	1.09	36.00	36.00
21	18.44	0.00	0.00	0.00	0.37	35.00	35.00	45	71.05	0.00	13.61	0.00	1.09	35.00	35.00
22	20.78	0.00	0.00	0.45	0.00	33.00	33.00	46	69.15	0.00	2.58	0.00	1.09	33.00	33.00
23	22.61	0.00	2.33	0.00	1.09	31.00	31.00	47	0.00	1.90	0.00	0.00	1.09	31.00	31.00

Una vez obtenida la Tabla 3.16, se procede a la representación de los datos que contiene.

En la Figura 3.15, se muestra la evolución de la energía demandada en función del tiempo y a la misma vez, también la energía almacenada. En ésta última se aprecia una evolución creciente que obliga a tener mayor capacidad de embalse y esto es debido a que, como se muestra en la Figura 3.16, al final del segundo día existe una energía eólica más o menos constante y elevada, a la vez que disminuye la demanda.

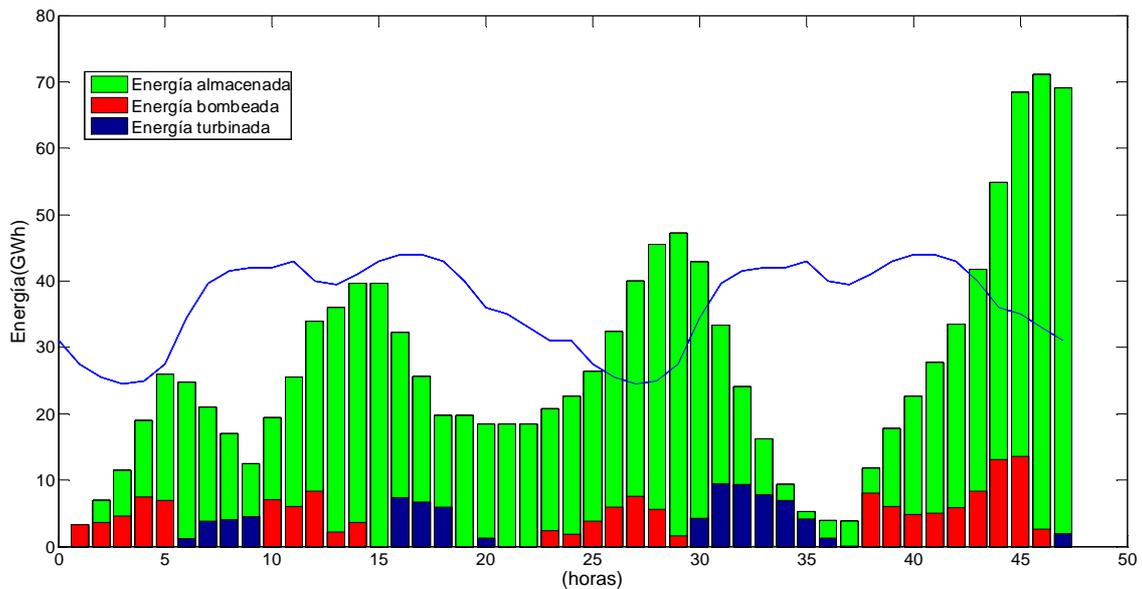


Figura 3.15. Demanda, energía bombeada, turbinada y almacenada en el Caso 2.2

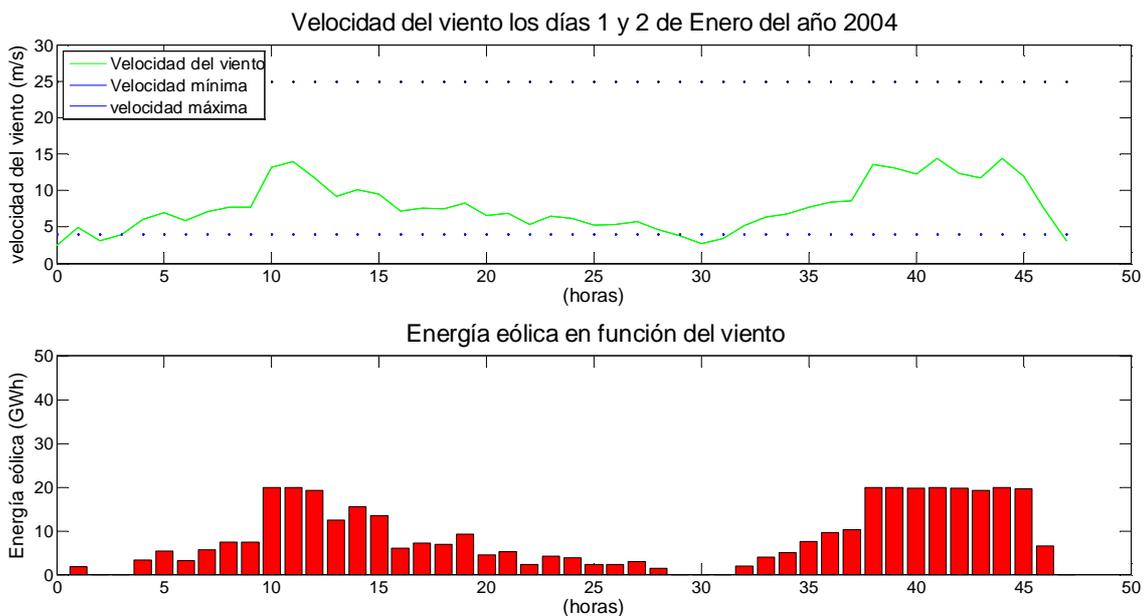


Figura 3.16. Evolución del viento y de la energía eólica en dos días de Enero

En la Figura 3.17, se observa la evolución durante los dos días considerados en las energías bombeada, turbinada, importada y exportada. Lo más llamativo es el crecimiento del bombeo en el último tramo del gráfico, pero ello es consecuencia del exceso de energía eólica que se produce en ese periodo junto con el desdénso de la demanda. Otra observación a tener en cuenta es que la energía exportada en ese tramo es máxima, es decir, que sólo se está bombeando el exceso.

También destacar que apenas existe importación ya que hay energía suficiente para cubrir la demanda en casi todas las horas del periodo considerado.

El valor que toma la función objetivo es de 96.83 M€.

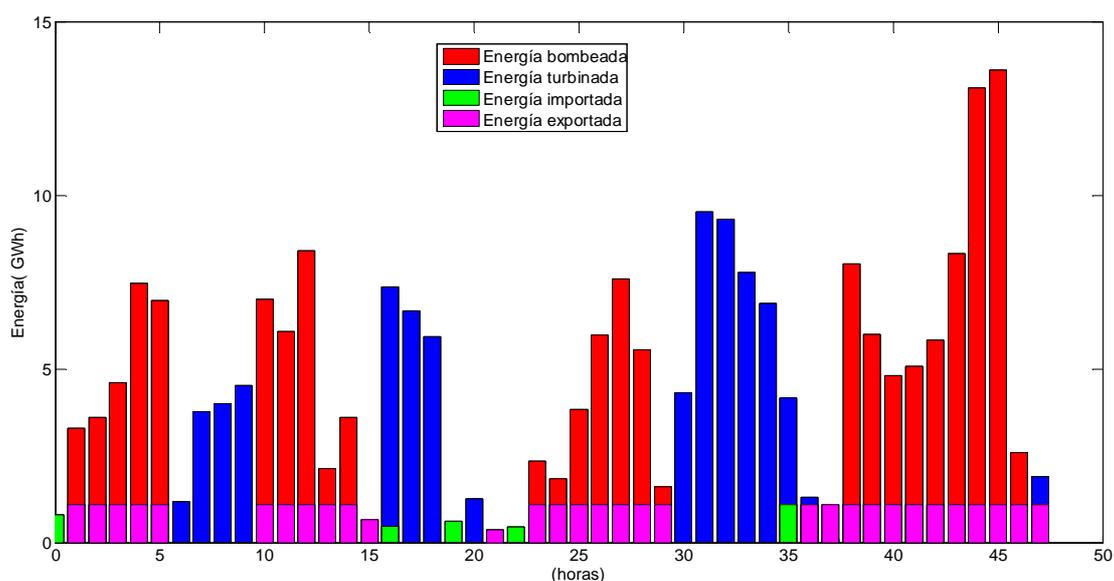


Figura 3.17. Energía bombeada, turbinada, importada y exportada en el Caso 2.2

2.3. Demanda cubierta con un 80% de la media de la demanda en energía base, una capacidad del 6% en las interconexiones y la energía eólica en función del viento en Enero del año 2004.

En este caso, al ampliar la interconexión, se tiene mayor margen de maniobra y sí existe una solución óptima al problema planteado. Los datos de los que se parte son 80% de la media de la demanda en energía de base, 6% de la media de la energía demandada en capacidad de interconexión con el exterior, y se puede bombear con el exceso de energía tanto eólica como de base, en los dos primeros días del mes de Enero del año 2004. Tras la ejecución del programa en GAMS, se obtienen los resultados expresados en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Resultados del problema de optimización para Caso 2.3

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)		HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)
0	3.29	0.00	0.00	1.90	0.00	31.00	31.00		24	24.44	0.00	0.89	0.00	0.93	31.00	31.00
1	6.89	0.00	3.29	0.00	0.00	27.50	27.50		25	29.4	0.00	2.88	0.00	0.93	27.50	27.50
2	11.49	0.00	3.60	0.00	0.00	25.50	25.50		26	37.06	0.00	5.02	0.00	0.93	25.50	25.50
3	18.94	0.00	4.60	0.00	0.00	24.50	24.50		27	41.68	0.00	7.59	0.00	0.00	24.50	24.50
4	23.73	0.00	7.45	0.00	0.00	25.00	25.00		28	41.68	0.00	4.62	0.00	0.93	25.00	25.00
5	23.64	0.00	4.78	0.00	2.18	27.50	27.50		29	38.46	0.00	0.00	0.00	1.60	27.50	27.50
6	20.96	0.09	0.00	2.18	0.00	34.50	34.50		30	30.04	3.21	0.00	2.18	0.00	34.50	34.50
7	18.05	2.67	0.00	2.18	0.00	39.70	39.70		31	21.83	8.41	0.00	2.18	0.00	39.70	39.70
8	14.64	2.91	0.00	2.18	0.00	41.50	41.50		32	15.15	8.21	0.00	2.18	0.00	41.50	41.50
9	19.45	3.41	0.00	2.18	0.00	42.00	42.00		33	9.36	6.67	0.00	2.18	0.00	42.00	42.00
10	25.51	0.00	4.81	0.00	2.18	42.00	42.00		34	5.20	5.79	0.00	2.18	0.00	42.00	42.00
11	33.90	0.00	6.06	0.00	0.00	43.00	43.00		35	2.89	4.16	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00
12	33.90	0.00	8.38	0.00	0.00	40.00	40.00		36	1.60	2.31	0.00	0.00	1.01	40.00	40.00
13	36.57	0.00	0.00	0.00	2.13	39.50	39.50		37	7.45	1.28	0.00	0.00	1.18	39.50	39.50
14	36.57	0.00	2.66	0.00	0.93	41.00	41.00		38	11.25	0.00	5.84	0.00	2.18	41.00	41.00
15	29.83	0.00	0.00	0.42	0.00	43.00	43.00		39	13.86	0.00	3.80	0.00	2.18	43.00	43.00
16	24.26	6.73	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00		40	16.75	0.00	2.61	0.00	2.18	44.00	44.00
17	19.43	5.57	0.00	2.18	0.00	44.00	44.00		41	20.38	0.00	2.88	0.00	2.18	44.00	44.00
18	19.43	4.82	0.00	2.18	0.00	43.00	43.00		42	26.50	0.00	3.62	0.00	2.18	43.00	43.00
19	19.26	0.00	0.00	1.70	0.00	40.00	40.00		43	37.39	0.00	6.12	0.00	2.18	40.00	40.00
20	19.26	0.16	0.00	2.18	0.00	36.00	36.00		44	48.81	0.00	10.89	0.00	2.18	36.00	36.00
21	19.26	0.00	0.00	0.72	0.00	35.00	35.00		45	49.21	0.00	11.42	0.00	2.18	35.00	35.00
22	20.66	0.00	0.00	1.54	0.00	33.00	33.00		46	45.13	0.00	0.39	0.00	2.18	33.00	33.00
23	21.56	0.00	1.39	0.00	0.93	31.00	31.00		47	41.05	4.08	0.00	0.00	2.18	31.00	31.00

En este caso el valor de la función objetivo es de 95.66 M€, algo inferior que en el Caso 2.2

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.17 se representan gráficamente en las Figura 3.18 y Figura 3.19.

Al no haber variado los días de operación, la gráfica que representa la velocidad del viento a lo largo del periodo de tiempo y la energía eólica producida es la misma que la ya mostrada en la Figura 3.16.

Como se puede observar en la Figura 3.18, el principal cambio que existe en relación con el mismo gráfico del Caso 2.2 es la disminución elevada de la energía almacenada con la consecuente disminución de horas de bombeo y turbinado.

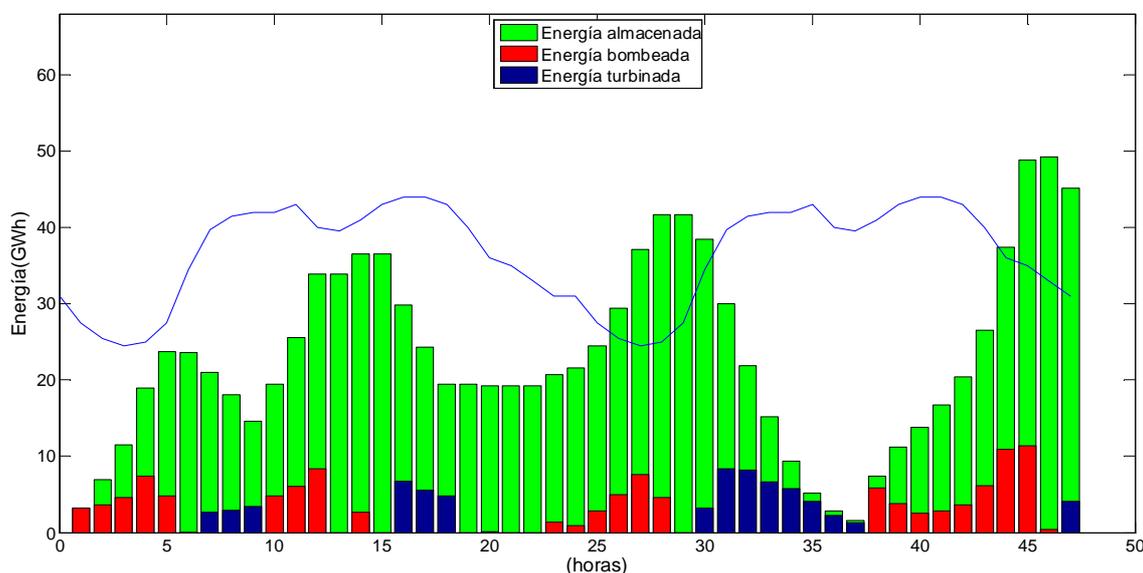


Figura 3.18. Demanda, energía bombeada, turbinada y almacenada en el Caso 2.3

Respecto a la Figura 3.19, se observa de nuevo que en las horas de exceso de energía es cuando se bombea y se exporta energía mientras que en las que hay déficit se importa y se turbinan.

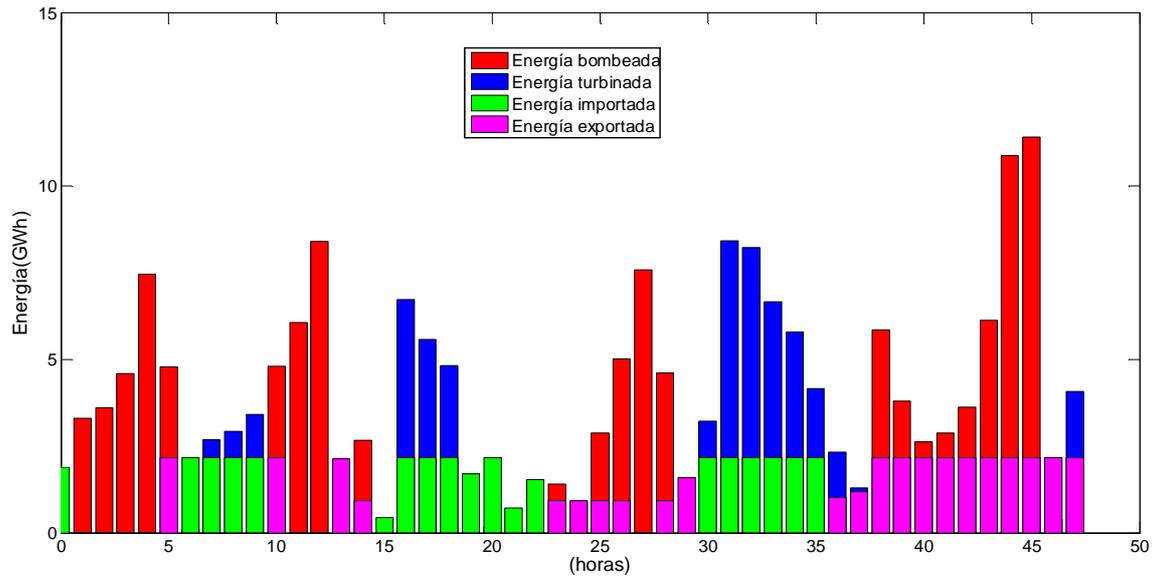


Figura 3.19. Energía bombeada, turbinada, importada y exportada en el Caso 2.3

2.4. Demanda cubierta con un 80% de la media de la demanda en energía base, 3% de capacidad de interconexión y energía eólica en función del viento en Junio del año 2004.

En este caso, los datos que se tienen son, la energía de base con un 80% de la media de la demanda, la capacidad de interconexión con el exterior con un 3% de la media de la demanda, la energía eólica en función de la velocidad del viento en dos días de Junio y el bombeo que se puede realizar con el excedente de energía de base y eólica. Pues con estos datos iniciales no se obtiene una solución válida a pesar de que en invierno haya más tiempo con una mayor energía eólica generada, y esto sucede porque, como se puede observar en la Figura 3.20, en los periodos de menor demanda es cuando mayor energía eólica se produce y hacen que la energía almacenada llegue a su límite, y por tanto, hacen que no sea viable una solución para este problema con los datos anteriores.

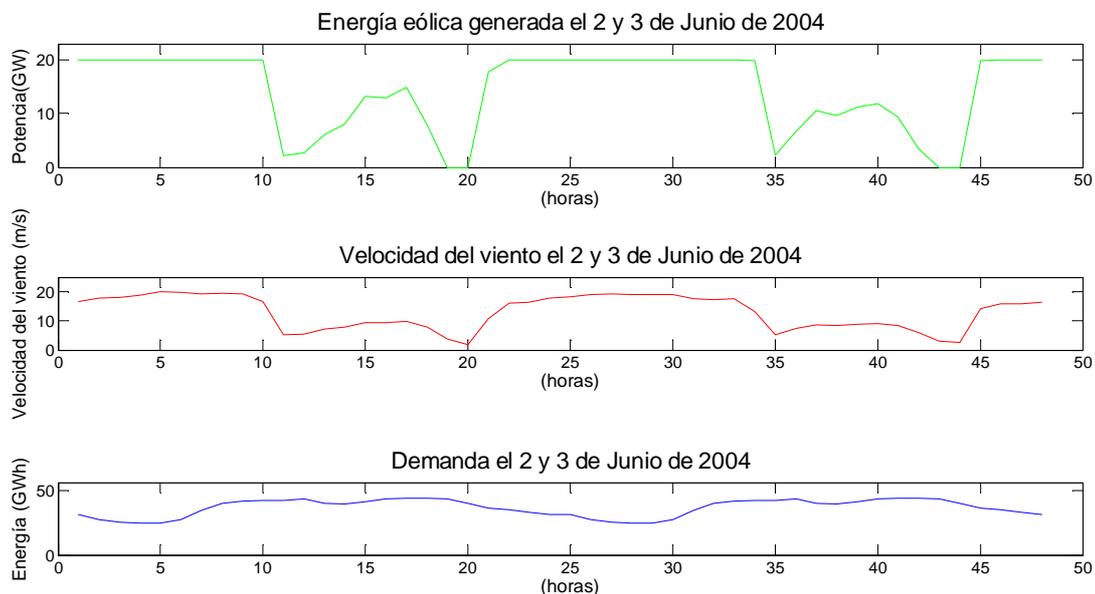


Figura 3.20. Energía eólica, velocidad del viento y demanda el 2 y 3 de Junio

Así pues, para darle una solución a este problema se puede simular la disminución de energía base hasta un porcentaje que sea viable el problema, dejando la capacidad de interconexión en el 3% de la media de la demanda, o por contrario, dejar la energía base con el 80% y aumentar hasta el 6% el porcentaje de la capacidad de interconexión con el exterior.

En el primero de los casos, en el cual se disminuye la energía base y se mantiene la capacidad de interconexión, comienza a ser viable cuando la energía base alcanza un valor del 66% de la media de la demanda, pero el intervalo donde existe solución no es muy grande ya que si se disminuye mucho el porcentaje llega a haber momentos en los que no se pueda cubrir la demanda. El otro extremo es el 61% de la media de la demanda. Así pues se va a simular el 65% de la media de la demanda como energía base con un 3% de capacidad de interconexión con el exterior.

2.5. Demanda cubierta con un 65% de la media de la energía demandada en energía base y energía eólica en función del viento en Junio del año 2004.

Este apartado trata la simulación del problema cuando el porcentaje de energía base es el 65% de la media de la demanda, un 3% de la media de la demanda como límite de capacidad de interconexión exterior, energía eólica en función de la velocidad del viento en Junio y con disponibilidad de bombeo el excedente de energía eólica y de la energía de base. Con estos datos como entrada se simula en GAMS y se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.18.

El valor de la función objetivo en este caso es de 104.38 M€.

Tabla 3.18. Resultados del problema de optimización para el Caso 2.5

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)	HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría (GWh)
0	12.64	0.00	12.64	0.00	0.00	31.00	31.00	24	63.68	0.00	11.55	0.00	1.09	31.00	31.00
1	28.78	0.00	16.14	0.00	0.00	27.50	27.50	25	78.74	0.00	15.05	0.00	1.09	27.50	27.50
2	46.93	0.00	18.14	0.00	0.00	25.50	25.50	26	95.79	0.00	17.05	0.00	1.09	25.50	25.50
3	66.07	0.00	19.14	0.00	0.00	24.50	24.50	27	113.84	0.00	18.05	0.00	1.09	24.50	24.50
4	85.17	0.00	19.10	0.45	0.00	25.00	25.00	28	131.39	0.00	17.55	0.00	1.09	25.00	25.00
5	102.34	0.00	17.17	1.02	0.00	27.50	27.50	29	146.45	0.00	15.05	0.00	1.09	27.50	27.50
6	112.52	0.00	10.17	1.02	0.00	34.50	34.50	30	154.50	0.00	8.05	0.00	1.09	34.50	34.50
7	117.49	0.00	4.97	1.02	0.00	39.70	39.70	31	157.35	0.00	2.85	0.00	1.09	39.70	39.70
8	120.66	0.00	3.17	1.02	0.00	41.50	41.50	32	158.40	0.00	1.05	0.00	1.09	41.50	41.50
9	123.33	0.00	2.67	1.02	0.00	42.00	42.00	33	158.85	0.00	0.44	0.00	1.09	42.00	42.00
10	108.29	15.04	0.00	1.09	0.00	42.00	42.00	34	141.67	17.17	0.00	0.00	1.09	42.00	42.00
11	92.66	15.63	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	35	128.03	13.63	0.00	0.00	1.09	43.00	43.00
12	83.46	9.19	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00	36	121.19	6.84	0.00	0.00	1.09	40.00	40.00
13	76.74	6.71	0.00	1.09	0.00	39.50	39.50	37	113.94	7.24	0.00	0.00	1.09	39.50	39.50
14	73.64	3.10	0.00	1.09	0.00	41.00	41.00	38	106.69	7.24	0.00	0.00	1.09	41.00	41.00
15	68.33	5.31	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	39	98.16	8.53	0.00	0.00	1.09	43.00	43.00
16	63.99	4.33	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00	40	86.11	12.05	0.00	0.00	1.09	44.00	44.00
17	52.61	11.38	0.00	1.09	0.00	44.00	44.00	41	68.14	17.96	0.00	0.00	1.09	44.00	44.00
18	34.34	18.26	0.00	1.09	0.00	43.00	43.00	42	47.69	20.44	0.00	0.00	1.09	43.00	43.00
19	19.08	15.26	0.00	1.09	0.00	40.00	40.00	43	30.24	17.44	0.00	0.00	1.09	40.00	40.00
20	23.47	0.00	4.39	0.00	1.09	36.00	36.00	44	36.77	0.00	6.52	0.00	1.09	36.00	36.00
21	31.03	0.00	7.55	0.00	1.09	35.00	35.00	45	44.32	0.00	7.55	0.00	1.09	35.00	35.00
22	40.58	0.00	9.55	0.00	1.09	33.00	33.00	46	53.87	0.00	9.55	0.00	1.09	33.00	33.00
23	52.13	0.00	11.55	0.00	1.09	31.00	31.00	47	65.42	0.00	11.53	0.00	1.09	31.00	31.00

Los resultados obtenidos anteriormente se pueden representar en forma gráfica para poder entender de forma más clara la solución del problema.

En la Figura 3.21 se puede observar lo que se representaba en la Figura 3.20 de manera más clara, aquí se observa como en las horas de valle es cuando más energía eólica se produce y en las horas en las que la mayor demanda existe es cuando la energía eólica es menor.

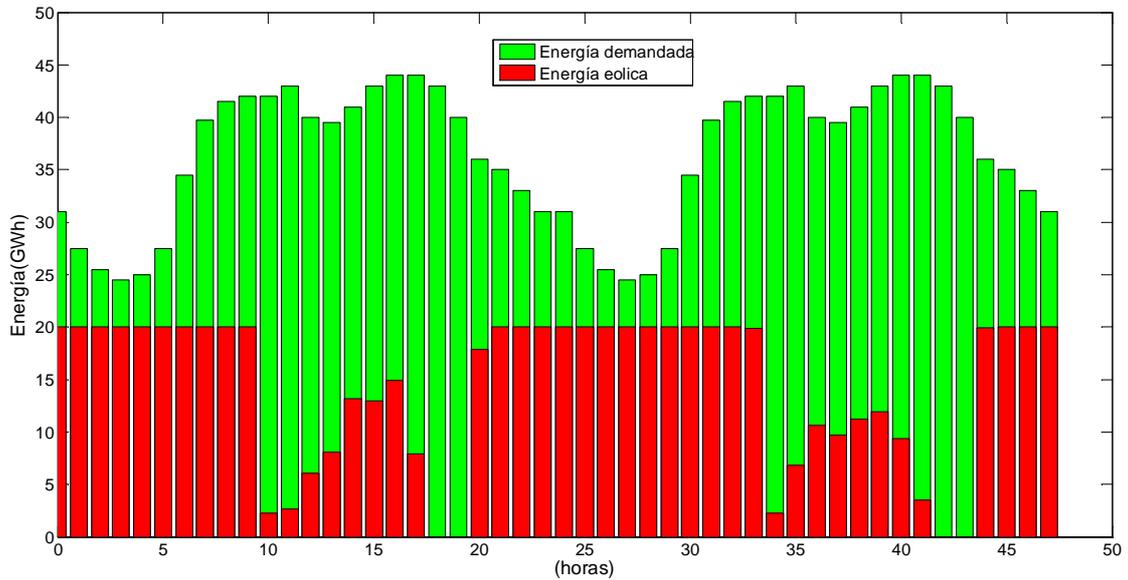


Figura 3.21. Demanda y energía eólica en el Caso 2.5

Esta mala distribución de energía eólica en relación con la energía demandada hace que se incrementen considerablemente los valores de bombeo y turbinado con la consecuencia inmediata del aumento de energía almacenada a niveles que duplican el mayor límite alcanzado hasta ahora. Como se observa en la Figura 3.22.

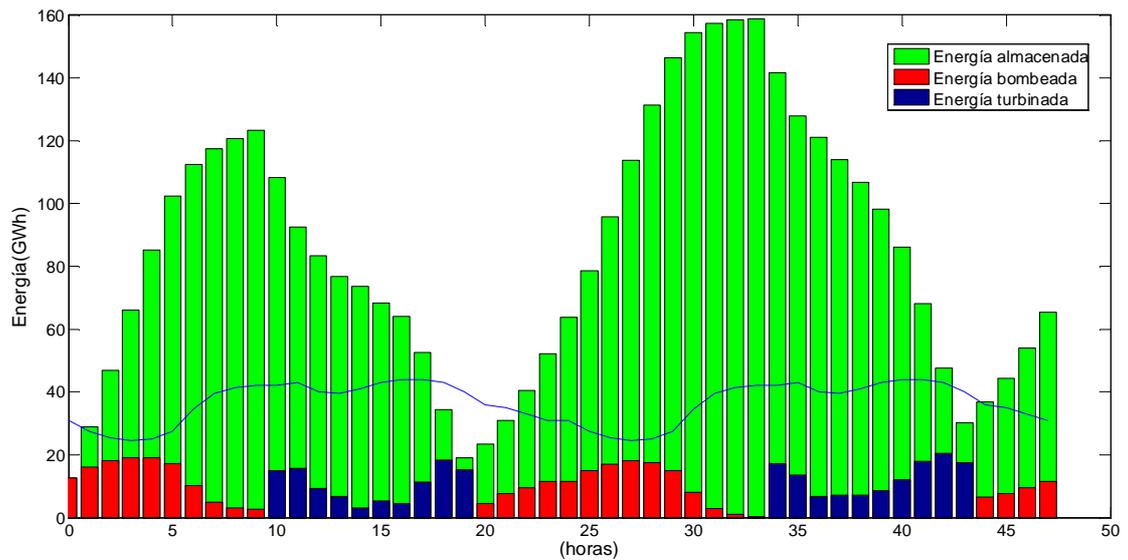


Figura 3.22. Demanda, energía bombeada, turbinada y almacenada en el Caso 2.5

En la Figura 3.23 se rompe la tendencia de exportar y bombear a la vez y de importar y turbinar en los mismos periodos. Aparecen dos largos periodos en los que no hay alternancia en la energía importada y exportada.

El comentario realizado con anterioridad sobre los niveles que se alcanzan en la energía bombeada y turbinada se observa con mayor claridad en la Figura 3.23.

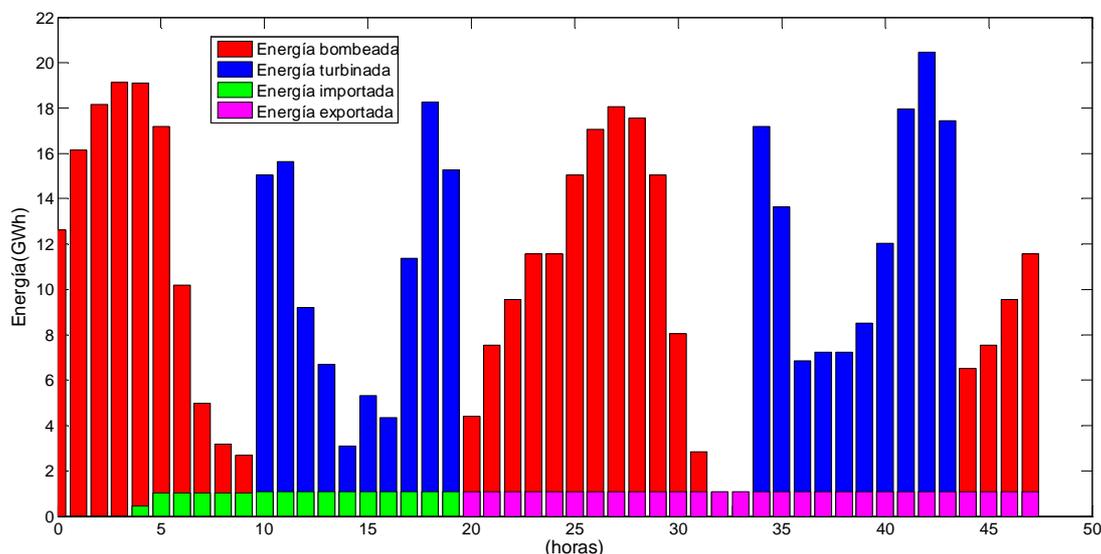


Figura 3.23. Energía bombeada, turbinada, importada y exportada en el Caso 2.5

2.6. Demanda cubierta con un 80% de la media de la energía demandada en energía base, límite en la capacidad de interconexión exterior de 6% y energía eólica en función del viento en Junio del año 2004.

En este caso, los datos de los que se parte para hacer la simulación son el porcentaje de energía base, 80% de la media de la demanda, el límite de la capacidad de energía intercambiada con el exterior del 6% y la energía eólica en función de la velocidad del viento en el mes de Junio, pudiendo bombearse tanto del exceso de energía eólica como del exceso de energía de base.

Pues con esta simulación obtenemos un resultado inviable debido a que se alcanza el límite de energía almacenada impuesto en 175GWh que coincide con el 20% de la energía demandada en un día.

Para obtener una solución viable se tendría que aumentar la interconexión con el exterior hasta el 14 % y se obtendría un valor en la función objetivo de 103.35 M€. Resultado poco viable por el porcentaje de interconexión que habría que aumentar. Otra solución sería la disminución del porcentaje de energía de base aumentando un 3% la capacidad de conexión con el exterior.

2.7. Demanda cubierta con un 65% de la media de la energía demandada en energía base, un 6% de capacidad en las interconexiones y la energía eólica en función del viento en Junio del año 2004.

Este apartado tiene como datos de entrada un 65% de la media de la demanda como energía base, un 6% de interconexión con el exterior y la disponibilidad de bombear con el excedente de energía eólica y de energía base. Una vez introducidos los datos, se simula en GAMS y éste proporciona una solución óptima y válida. Con resultado de la función objetivo de 93.35 M€.

Los resultados obtenidos tras la simulación se muestran en la Tabla 3.18.

Tabla 3.19. Resultados del problema de optimización para el Caso2.7

HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)		HORAS	Almacena da (GWh)	Turbinada (GWh)	Bombeada (GWh)	Importada (GWh)	Exportada (GWh)	Demanda (GWh)	Demanda que habría que habría (GWh)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	12.64	31.00	31.00		24	0.00	0.00	0.00	0.00	12.64	31.00	31.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	16.14	27.50	27.50		25	0.00	0.00	0.00	0.00	16.14	27.50	27.50
2	0.00	0.00	0.00	0.00	18.14	25.50	25.50		26	0.00	0.00	0.00	0.00	18.14	25.50	25.50
3	0.00	0.00	0.00	0.00	19.14	24.50	24.50		27	0.00	0.00	0.00	0.00	19.14	24.50	24.50
4	0.00	0.00	0.00	0.00	18.64	25.00	25.00		28	0.00	0.00	0.00	0.00	18.64	25.00	25.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	16.14	27.50	27.50		29	0.00	0.00	0.00	0.00	16.14	27.50	27.50
6	0.00	0.00	0.00	0.00	9.14	34.50	34.50		30	0.00	0.00	0.00	0.00	9.14	34.50	34.50
7	0.00	0.00	0.00	0.00	3.94	39.70	39.70		31	0.00	0.00	0.00	0.00	3.94	39.70	39.70
8	0.00	0.00	0.00	0.00	2.14	41.50	41.50		32	0.00	0.00	0.00	0.00	2.14	41.50	41.50
9	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64	42.00	42.00		33	0.00	0.00	0.00	0.00	1.53	42.00	42.00
10	0.00	0.00	0.00	16.13	0.00	42.00	42.00		34	0.00	0.00	0.00	16.08	0.00	42.00	42.00
11	0.00	0.00	0.00	16.72	0.00	43.00	43.00		35	0.00	0.00	0.00	12.54	0.00	43.00	43.00
12	0.00	0.00	0.00	10.28	0.00	40.00	40.00		36	0.00	0.00	0.00	5.75	0.00	40.00	40.00
13	0.00	0.00	0.00	7.80	0.00	39.50	39.50		37	0.00	0.00	0.00	6.15	0.00	39.50	39.50
14	0.00	0.00	0.00	4.19	0.00	41.00	41.00		38	0.00	0.00	0.00	6.15	0.00	41.00	41.00
15	0.00	0.00	0.00	6.40	0.00	43.00	43.00		39	0.00	0.00	0.00	7.44	0.00	43.00	43.00
16	0.00	0.00	0.00	5.43	0.00	44.00	44.00		40	0.00	0.00	0.00	10.95	0.00	44.00	44.00
17	0.00	0.00	0.00	12.47	0.00	44.00	44.00		41	0.00	0.00	0.00	16.87	0.00	44.00	44.00
18	0.00	0.00	0.00	19.35	0.00	43.00	43.00		42	0.00	0.00	0.00	19.35	0.00	43.00	43.00
19	0.00	0.00	0.00	16.35	0.00	40.00	40.00		43	0.00	0.00	0.00	16.35	0.00	40.00	40.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	5.48	36.00	36.00		44	0.00	0.00	0.00	0.00	7.61	36.00	36.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	8.64	35.00	35.00		45	0.00	0.00	0.00	0.00	8.64	35.00	35.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00	10.64	33.00	33.00		46	0.00	0.00	0.00	0.00	10.64	33.00	33.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00	12.64	31.00	31.00		47	0.00	0.00	0.00	0.00	12.64	31.00	31.00

Cabe destacar, incluso antes de la representación gráfica, el que no se necesite bombear ni turbinar nada en todo el periodo considerado, manteniéndose por tanto, el nivel de energía almacenada en su estado inicial. En este caso nulo.

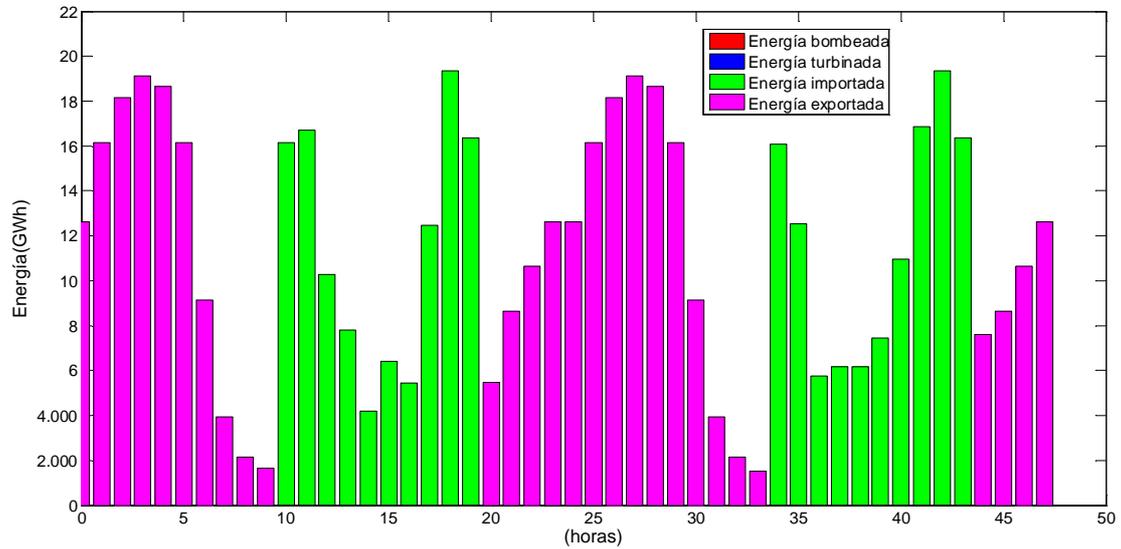


Figura 3.24. Energía bombeada, turbinada, importada y exportada en el Caso 2.7

Esta conclusión extraída de la Tabla 3.18, se ve de manera más clara en la Figura 3.24 donde sólo aparecen barras de energía importada y de energía exportada, siendo nulas las de bombeo y turbinado.