

El problema de optimización

2.1 Introducción

La generación de energía renovables, y en particular la eólica, se ha incrementado en los últimos años y va a seguir aumentando en los siguientes, debido a la política de la Unión Europea y de otros países en la promoción e incentivación de las energías renovables con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y cumplir lo pactado en el protocolo de Kioto.

El objetivo de la Unión Europea era llegar a que el 22% de la energía producida fuera procedente de las energías renovables para el año 2010, y que la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero para 2012 fuese del 5% respecto al año base 1990 y para cumplir este objetivo, la energía eólica es fundamental[1,2,3].

Pero, la generación eólica tiene una característica intermitente según unos patrones diurnos y estacionales del comportamiento del viento. Lo cual implica, que para una implementación y una integración a gran escala de la energía eólica en el sistema eléctrico, hay que introducir nuevas herramientas de control y gestión. Bien sea con nuevos equipos o con almacenamiento de energía o con la complementariedad de ambos, para optimizar los recursos energéticos y paliar, en parte, la fluctuabilidad del viento.

El uso de métodos de almacenamiento de energía contribuirá en la generación de energía eléctrica a partir de la eólica en el seguimiento de un determinado plan de producción, mejorando su inclusión en el mercado y optimizando su propio funcionamiento.

2.2. Partes del sistema

El sistema eléctrico que se va a tratar es una simplificación del sistema eléctrico español. Como se puede observar en la Figura 2.1, se tiene en cuenta en la producción de energía eléctrica para cubrir la demanda una base de energía térmica, la energía eólica, el turbinado del agua del depósito superior que previamente se ha bombeado con el excedente de energía eólica y que se encontraba en un depósito inferior y las importaciones/exportaciones del exterior.

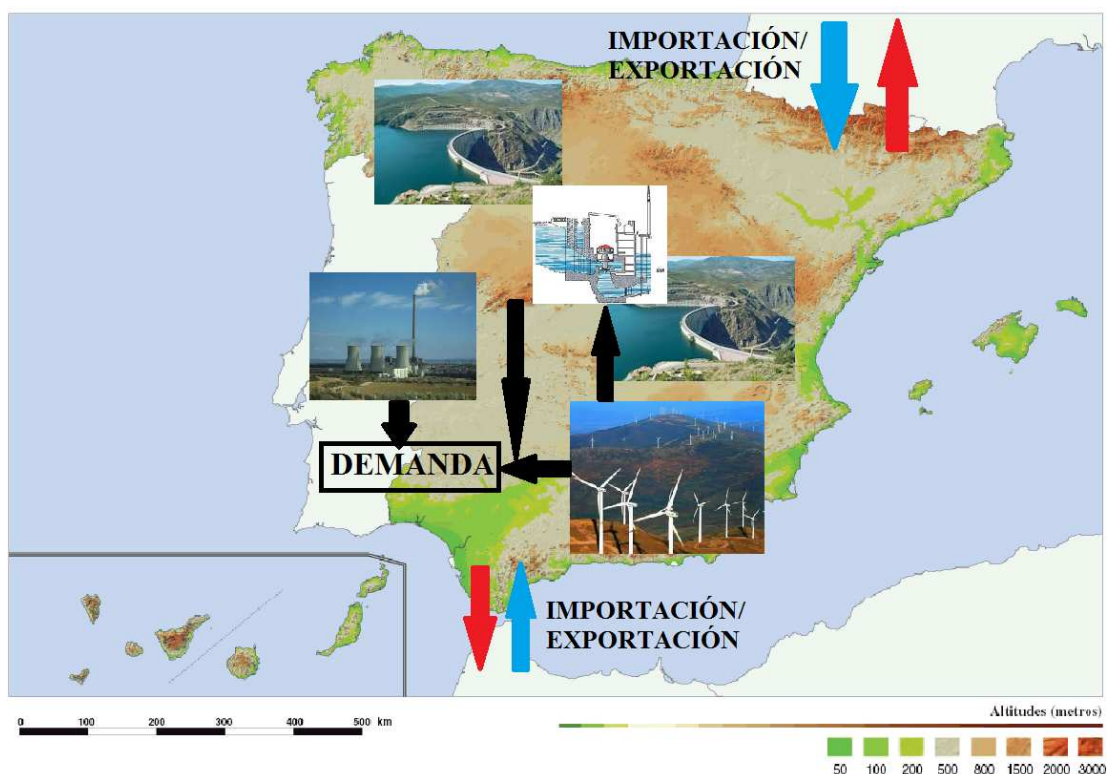


Figura 2.1. Partes que forman el sistema

La simplificación se basa en la consideración de una o varias centrales térmicas centralizadas en un punto, al igual que un gran parque eólico situado en un punto con una velocidad del viento representativa del país. Además de considerar dos grandes depósitos de agua con una gran sala de turbinado y bombeo situados en el entorno del parque eólico.

Tampoco se tiene en cuenta el agua que se pueda almacenar en los depósitos a través de cauces naturales ni mediante las precipitaciones, sino que se considera un sistema cerrado en el que no hay pérdidas ni ganancias de fluido.

Una vez definidas las simplificaciones, se definen los elementos que constituyen el sistema.

Depósito superior. Embalse de gran capacidad situado en una cota mayor que el depósito inferior de forma que exista la suficiente diferencia de cota como para poder turbinar el agua contenida en él. Dependiendo de la relación altura-caudal se pueden utilizar diferentes tipos de turbinas para extraer la energía al agua.

Depósito inferior. Embalse de mayor capacidad que el superior, donde llegará el agua después de haber sido turbinada. El hecho de que sea de mayor capacidad tiene varios motivos:

El agua del depósito inferior puede ser utilizada para riego en el ámbito agrícola o en el propio consumo humano tras haber sido potabilizada y tratada adecuadamente, pero esta consideración no la contempla el sistema planteado ya que no hay pérdidas, salidas ni entradas de fluidos en el sistema excepto la existente en los depósitos.

En condiciones normales, sin simplificación, el depósito inferior se alimentaría de mayores caudales de agua que el superior por el hecho de estar en una menor cota, es decir, que siempre contendría, por causas naturales, una mayor cantidad de agua.

Por estos motivos, que en nuestro sistema no nos afecta, la capacidad del depósito inferior debe de ser mayor que la del superior.

Central de bombeo y turbinado. Se trata de una central hidroeléctrica de gran capacidad, formada por el número necesario de turbinas y bombas que sea capaz de turbinar o bombear según las necesidades del sistema la cantidad de energía que se requiera en el momento.

Dependiendo de la característica diferencia de altura-caudal, se pueden utilizar diferentes tipos de turbinas o bombas.

Si el caudal es muy pequeño pero la diferencia de cotas entre depósitos es elevada, se utilizaría una turbina Pelton como la mostrada en la Figura 2.2 a), para poder extraer de forma más eficiente la energía cinética del agua.

El inconveniente de este tipo de turbina es que no es reversible, es decir, no puede funcionar como bomba para devolver el agua al depósito superior en horas de valle o de exceso de energía eólica



a)



b)

Figura 2.2. Turbina Pelton (a) [13] , Turbina Francis (b) [14].

En caso contrario, de que la diferencia de cotas no sea tanta, pero que el caudal sea abundante, se utilizan turbinas Kaplan, Francis, Figura 2.2 b), o una mixta que hay entre ambas.

Como se puede observar en la Figura 2.3 dependiendo de la altura, del caudal y de la potencia que se necesite extraer, se elegirá un tipo de turbina u otra. La ventaja de la turbina Francis, turbina Kaplan y turbina Mixta es que pueden funcionar como bombas. Son reversibles.

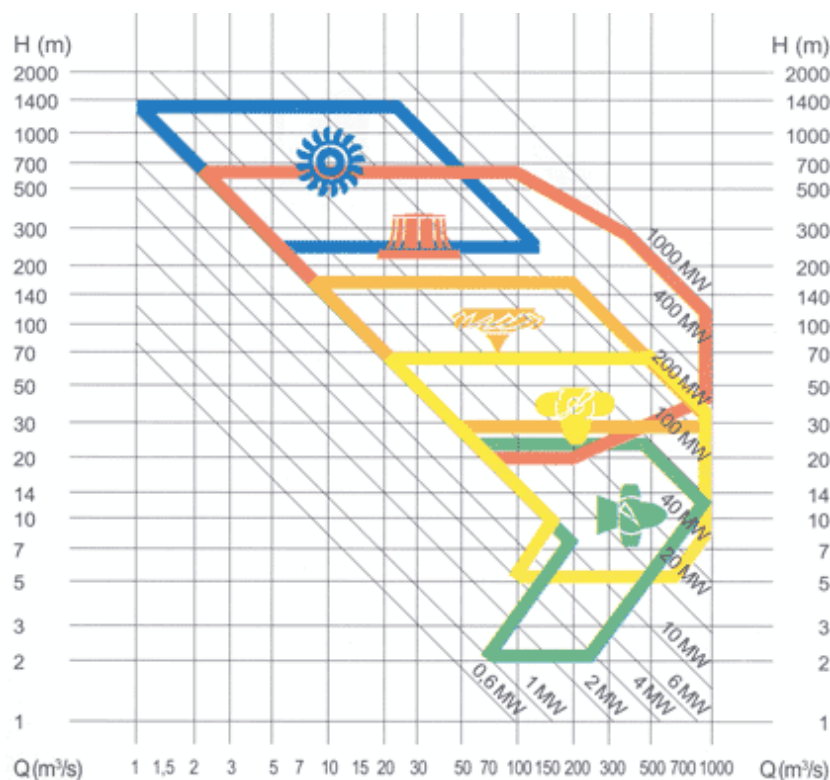


Figura 2.3. Característica Altura-Caudal en Turbinas [15].

Central térmica. La central térmica que se considera en este proyecto es, al igual que la hidráulica, una gran central o un conjunto de las mismas ubicadas en un mismo punto que sirven como base energética del modelo eléctrico del país.

La central térmica puede ser de cualquiera de los tipos existentes, tanto las convencionales de combustión de combustibles fósiles, mejoradas con los sistemas de ciclo combinado, pasando por las nucleares y llegando a las térmicas solares.

Este tipo de central es el de base porque son sistemas que poseen una gran inercia y no son capaces de atender las variaciones más o menos bruscas en la demanda.

Interconexión con el exterior. Esta parte del sistema modela las interconexiones con los países colindantes, siendo éstas, las conexiones España-Francia, España-Portugal y España-Marruecos y viceversa.

La interconexión no es sólo un elemento de traspaso de energía entre países fronterizos, sino que también es un elemento que le da estabilidad al sistema ya que lo hace más robusto y fiable.

Las importaciones y exportaciones en España no llegan al 3% de la energía total generada y a veces, como en el año 2010, en cómputo anual, se exportó más energía de la que se importó, como se puede observar en la tabla 4.

Tabla 2.1. Intercambios internacionales de energía eléctrica 2010 (GWh) [5].

	Importación	Exportación	Saldo
Transacciones (mercado + contratos bilaterales físicos)	3577	11931	-8354
Francia	1842	3379	-1537
Portugal	1719	4367	-2648
Andorra	0	264	-264
Marruecos	16	3921	-3905
Acciones coordinadas de balance Francia - España	23	9	14
Acciones coordinadas de balance Portugal - España	17	1	15
Intercambios de apoyo	0	0	0
Desvíos de regulación objeto de compensación			-8
Saldo físico de los intercambios internacionales			-8333

Parque eólico. Se trata de un gran parque eólico o un conjunto de ellos que tienen como misión producir energía eléctrica a través de la energía cinética del viento.

El inconveniente principal de este tipo de energía es la variabilidad del viento según la hora del día, el día, el mes o la estación del año en la que se encuentre operando. Y, debido a esta fluctuabilidad, el sistema se ve obligado a incorporar algún método de almacenamiento de energía de forma tal que, cuando haya un exceso de energía se pueda almacenar, a pesar de perder parte de ella debida a los rendimientos, y cuando haya déficit de energía, bien porque no haya viento suficiente o bien porque la demanda sea mayor que la generación, se pueda liberar esa energía para abastecer la demanda.

Hay numerosos tipos de aerogeneradores, clasificados por potencias, por radio de las palas, o por disposición del eje de rotación.

Según la disposición del eje de rotación podemos encontrar dos tipos de aerogeneradores, los de eje vertical y los de eje horizontal.

La velocidad del viento a la que trabajan los aerogeneradores no es la que existe a nivel de superficie, así pues para calcular la velocidad de viento con la que trabaja, se mide la velocidad del viento a una altura base de 10 o 20 metros y después se lleva esa medida a la altura a la cual se encuentra el eje del aerogenerador, en caso de aerogenerador de eje horizontal 100m. [20]

Para trasladar el valor de la velocidad medida a la altura donde se encuentra el eje del aerogenerador, hay que tener en cuenta la característica del perfil de velocidades.

La velocidad del viento varía con la altura y depende fuertemente de la naturaleza del terreno sobre el cual se desplazan las masas de aire. La variación de velocidad sigue la siguiente expresión:

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

Donde el subíndice 1 implica las características del viento a altura de referencia y el subíndice 2 indica el valor de la altura en la cual queremos calcular la velocidad del viento. El exponente α (exponente de Hellmann) es el que caracteriza al terreno pudiendo variar entre 0,08 en superficies lisas hasta 0,40 en terrenos muy accidentados. Como se puede observar en la Tabla 2.1 y en la Figura 2.4.

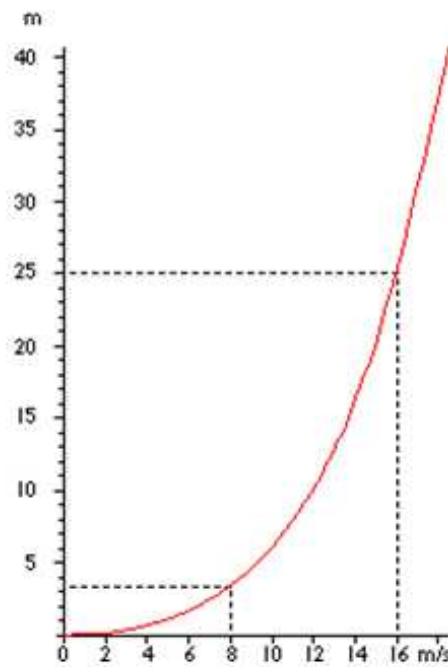


Figura 2.4. Característica Velocidad – Altura [21].

El parámetro α es determinado empíricamente y la ecuación puede ser usada para ajustar datos en el rango de 10 hasta 100 ó 150 metros si no hay obstáculos en forma de picos agudos en el terreno. El exponente α varía con la altura, hora del día, época del año, naturaleza del terreno, velocidades de viento y temperatura [21]. Como se puede observar en la Tabla 2.2 los coeficientes van variando dependiendo del tipo de terreno.

Tabla 2.2. Coeficientes de fricción según el terreno [21.]

COEFICIENTE DE FRICCIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE TERRENO	
Tipos de terreno	Coeficientes de fricción α
Lagos, océanos, superficies suaves y duras	0.10
Césped	0.15
Terrenos de cultivo, setos o vallas y arbustos	0.20
Campo boscoso con muchos árboles	0.25
Pueblo pequeño con algunos árboles y arbustos	0.30
Área de ciudad con edificios altos o terrenos muy accidentados	0.40

El perfil de velocidad del viento varía en función del terreno como se muestra en la Figura 2.5, siendo la capa límite mayor en los lugares donde hay más rugosidad en el terreno.

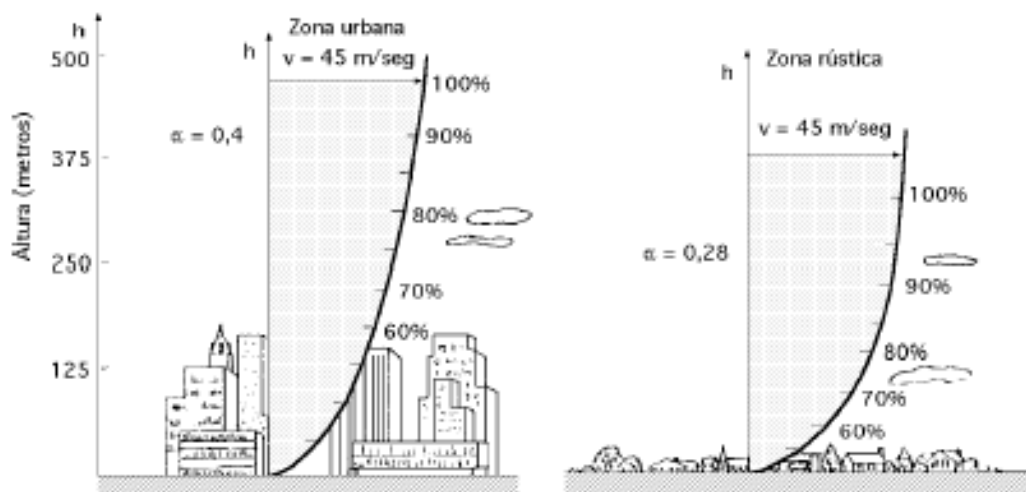


Figura 2.5. Capa límite en función del terreno [22]

Además de la velocidad del viento se ha de tener en cuenta los límites de funcionamiento del aerogenerador en función de la velocidad del viento y otra serie de valores que se pueden observar en la Figura 2.6. [23]

- **Velocidad de puesta en marcha** - Velocidad a la que el rotor y el conjunto de palas empieza a girar.
- **Velocidad de conexión** - Velocidad del viento mínima a la que la turbina eólica generará energía utilizable. Esta velocidad de viento está normalmente entre 4 y 6 m/s en la mayoría de las turbinas.
- **Velocidad nominal** - Velocidad del viento mínima a la que la turbina eólica generará su potencia nominal designada. La velocidad nominal depende del tipo de aerogenerador que se esté considerando. A través de la curva de potencia, figura 10, que aporta cada compañía para cada aerogenerador se calcula la energía que se puede extraer según la velocidad del viento.
- **Velocidad de corte** - A velocidades muy altas, por lo general mayores de 25 m/s, la mayoría de las turbinas de viento detiene la generación de energía. La velocidad del viento en la que se apaga se llama velocidad de desconexión o velocidad de corte. El tener una velocidad de desconexión es una medida de seguridad que protege a la turbina frente a daños provocados por vibraciones excesivas.

La desconexión se puede efectuar de diferentes maneras, en algunas máquinas mediante un freno automático que es activado por un sensor de velocidad del viento. Hay otros que usan "spoilers", aletas de arrastre montados en las palas, que se activan automáticamente por el rotor, o mecánicamente por un dispositivo de resorte. El funcionamiento normal se reanuda cuando el viento pasa de nuevo a un nivel seguro

Un dato importante es que la cantidad de energía que el viento puede generar no es una función uno a uno. La de energía eólica es función del cubo de la velocidad del viento. Así pues, si se duplica la velocidad del viento, se obtiene ocho veces más energía. Esta es una razón por la que hay que mirar los mapas de viento.

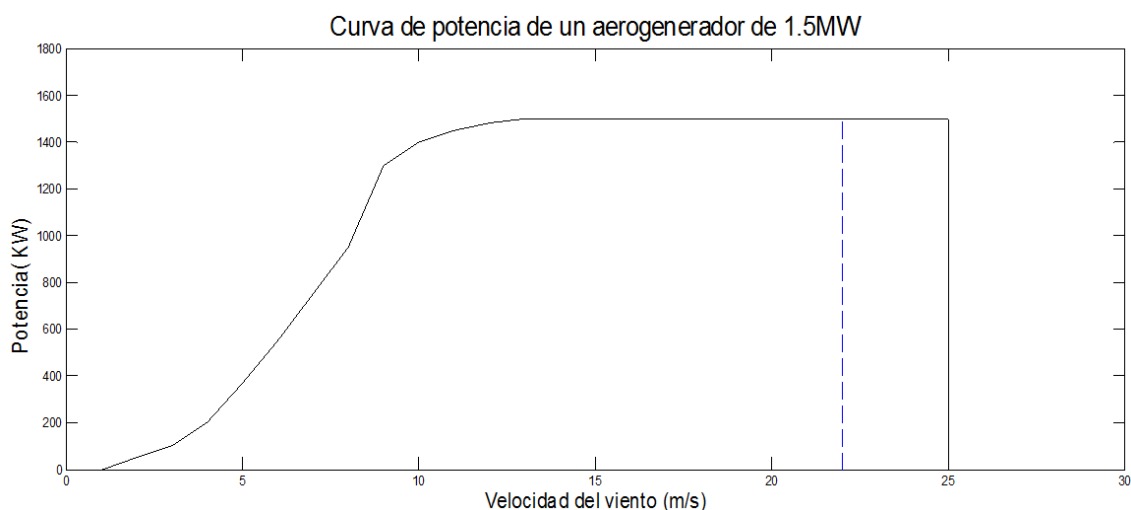


Figura 2.6. Curva Potencia- Velocidad del viento [23]

Cabe destacar la caída repentina que sufre la producción de energía cuando se alcanza la velocidad de corte o desconexión, en este caso 25m/s. Llevando a cabo la protección de los aerogeneradores ante vibraciones excesivas.[23]

2.3. Modelado del problema de optimización

El problema a resolver se trata de un problema complejo, debido a la fluctuabilidad del viento, de la demanda y de los precios de cada energía, por ello, se hará una simplificación en los siguientes términos:

El sistema es cerrado por lo que no hay pérdida ni adición de agua en él.

Se considera sólo la capacidad y la energía almacenada en el depósito superior, implicando esto que el depósito inferior se adapta a las necesidades y condiciones del depósito superior.

No hay límites de capacidad para bombear ni para turbinar, excepto aquellos impuestos por la capacidad de los depósitos y el límite impuesto por la casación óptima de la energía.

No se tienen en cuenta las pérdidas energéticas en el sistema salvo las introducidas por los rendimientos de las bombas, de las turbinas y de los aerogeneradores.

Sólo se tiene en cuenta el modelado de la parte activa de la energía ya que es la parte que interesa para abastecer la demanda.

Se considera que los costes de cada tipo de energía se mantienen constantes, y no tienen una parte fija y otra variable.

Para la resolución del problema de optimización se necesita resolver un modelo no lineal mediante un programa de optimización debido al gran número de variables, la no linealidad del problema viene introducida por la existencia de productos entre variables cuando se definen las restricciones del problema.

El problema de optimización tiene como objetivo principal el de cubrir la demanda eléctrica por horas con las diferentes fuentes de energía disponibles y minimizando los costes de producción.

Como entradas el problema de optimización va a tener:

- Previsión del viento de dos días consecutivos.
- Curva potencia-viento de un aerogenerador
- Previsión de demanda de dos días consecutivos.
- Costes de cada tipo de energía.
- Límites de capacidad de los depósitos y energía inicial almacenada.
- Límite de capacidad de interconexión.
- Base de energía térmica en porcentaje de la media de la demanda.

Con las dos primeras entradas se elabora una curva de energía eólica prevista para dos días consecutivos.

A continuación se muestra el modelo simplificado que se va a tener en cuenta en el presente trabajo:

Función objetivo:

$$\min. \sum_{t=1}^{48} \sum_{i=1}^{\text{energías}} \text{Energía}_i(t) \cdot \text{Costes}_i$$

$\text{Energía}_i(t)$ hace referencia a cada tipo de energía en función del tiempo. Las consideradas son energías térmica, eólica, bombeada, turbinada, almacenada, importada y exportada que se han denotado con los subíndices (i, energías). Y Costes_i los costes de producción de cada tipo de energía mencionado anteriormente.

El tiempo (t) viene dado en horas y abarca las 48 horas de dos días consecutivos.

demanda (t) hace referencia a la energía eléctrica demandada en cada hora.

η es el rendimiento de las bombas y de las turbinas (en este trabajo van a coincidir y va a ser del 80% cada uno, por ello el rendimiento del ciclo bombeo/turbinado completo es del 64%).

Sujeto a:

$$\text{Energía}_{\text{importada}}(t) \leq 0,03 \cdot \text{demanda}(t) \quad [\text{ec.1}]$$

$$\text{Energía}_{\text{exportada}}(t) \leq 0,03 \cdot \text{demanda}(t) \quad [\text{ec.2}]$$

$$\text{Energía}_{\text{almacenada}}(t) \leq K \cdot \sum_{t=1}^{48} \text{demanda}(t) \quad [\text{ec.3}]$$

$$\text{Energía}_{\text{exportada}}(t) \cdot \text{Energía}_{\text{importada}}(t) = 0 \quad [\text{ec.4}]$$

$$\text{Energía}_{\text{bombeada}}(t) \cdot \text{Energía}_{\text{turbinada}}(t) = 0 \quad [\text{ec.5}]$$

$$\text{Energía}_{\text{eólica}}(t) \cdot \eta \geq \text{Energía}_{\text{bombeada}}(t) \quad [\text{ec.6}]$$

$$\text{Energía}_{\text{alamcenada}}(t) \cdot \eta \geq \text{Energía}_{\text{turbinada}}(t) \quad [\text{ec.7}]$$

$$\text{Energía}_{\text{demandada}}(t) = \sum_i^{\text{energías}} \text{Energía}_i(t) \quad [\text{ec.8}]$$

$$\text{Energía}_{\text{exportada}}(t) \geq 0 \quad [\text{ec.9}]$$

$$\text{Energía}_{\text{importada}}(t) \geq 0 \quad [\text{ec.10}]$$

$$\text{Energía}_{\text{almacenada}}(t) \geq 0 \quad [\text{ec.11}]$$

$$\text{Energía}_{\text{turbinada}}(t) \geq 0 \quad [\text{ec.12}]$$

$$\text{Energía}_{\text{bombeada}}(t) \geq 0 \quad [\text{ec.13}]$$

A continuación se describen cada una de las ecuaciones anteriormente presentadas y cuál es el significado que tienen.

La función objetivo tiene como misión la de minimizar los costes totales de la casación de la energía de las diferentes fuentes para cubrir la demanda por ello se minimiza el sumatorio de todas las horas del sumatorio del producto de cada energía por su coste.

Las ecuaciones (1) y (2) imponen los límites de energía importada y exportada que en España no excede el 3% de la energía demandada, teniendo en cuenta las interconexiones con Francia, Portugal y Marruecos. Además se modificará este límite del 3% hasta el 6% duplicando su capacidad de interconexión para observar la variabilidad de la solución óptima ante diferentes estados del sistema.

La ecuación (3) impone un límite de energía almacenada en función de la energía demandada, mediante un porcentaje de la misma, en un periodo de tiempo de dos días, es decir, siempre y cuando K sea menor que la unidad, la cantidad de energía que se puede almacenar en el depósito superior será inferior que la energía demandada en dos días.

La ecuación (4) impone que en un periodo de tiempo sólo se puede importar o exportar energía, no se pueden hacer las dos acciones a la vez, y a su vez es una de las ecuaciones que introducen la no linealidad en el problema, ya que aparece un producto de variables.

La ecuación (5) impone que en un periodo de tiempo sólo se puede bombear o turbinar energía, no se pueden realizar las dos acciones a la vez, y a su vez es la otra ecuación que introduce la no linealidad en el problema.

La ecuación (6) que restringe la energía bombeada, ya que ésta no puede ser mayor que la energía eólica, pues sólo se bombea el exceso de energía eólica. Esta energía se ve afectada por el rendimiento ya que toda la energía eólica sobrante no se puede bombear debido al rendimiento de la bomba.

La ecuación (7) es una inecuación que restringe la energía turbinada, ya que ésta no puede ser mayor que la energía almacenada, pues sólo se puede turbinar la energía que está almacenada. Esta energía se ve afectada por también por el rendimiento ya que toda la energía almacenada no se puede aprovechar.

La ecuación (8) impone que la energía demanda sea la suma de todas las energías que aportan energía restándole aquellas que tienen una influencia contraria, como son las exportaciones y el bombeo.

La ecuación (9) es una inecuación que impone que la energía exportada sea positiva. Al introducir esta energía en la función objetivo irá con signo negativo ya que tratamos de minimizar costes y al vender energía obtenemos beneficios.

Las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) son inecuaciones que imponen que las variables sean positivas.

