



---

# ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ESPAÑA

---



Autor: Diego García Cuenca

Director: Matías Sánchez Mingarro

15 DE ABRIL DE 2016

I.C.A.I



“El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza”

Leonardo Da Vinci



## Agradecimientos:

A mis padres por su paciencia y por la educación y libertad que me han dado,

A Jorge por ser mi amigo y a la vez mi hermano,

A José Carlos por su inestimable ayuda y por haber compartido conmigo su  
visión de la sostenibilidad,

A Paula por ser la suerte de mi vida.



## Resumen

En España, en la actualidad la producción de energía hidráulica supone un 11% de la producción total de energía, sin embargo la potencia instalada es un 20% de la potencia instalada total. Estos valores implican que tal vez la energía hidráulica no se esté utilizando de manera eficiente.

En este proyecto se determinará el potencial hidráulico aun explotable en condiciones de sostenibilidad en España y se analizará mediante un complejo modelo de simulaciones que posibles cambios podría traer a un país como España un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos.

También se analizarán los sistemas hidráulicos de bombeo y que ventajas tienen para el sistema eléctrico, y por último se estudiarán los diferentes impactos medioambientales que la energía hidráulica provoca y que maneras hay de evitar o minimizar esos daños.



## Abstract

In Spain, currently the production of hydropower accounts for 11% of total energy production, but the installed power is 20% of the total installed capacity. These values imply that perhaps water power is not being used sustainably.

In this project the exploitable hydroelectric potential is going to be determined in terms of sustainability in Spain and using a complex model of simulations, we are going to try to determine what changes this better use of water resources would bring to Spain.

Hydraulic pumping systems will be analyzed as well as their advantages for the electrical system, and finally it will be studied the various environmental impacts of hydropower causes and the ways to avoid or minimize such damage.



# Índice:

## Tabla de contenido

1. Introducción: .....	8
2. Objetivos: .....	9
2.1 Determinar el potencial hidráulico explotable de manera sostenible en España: .	9
2.2 Ventajas que un mejor y más eficiente aprovechamiento de los recursos hídricos podría traer a España: .....	10
2.3 Centrales hidráulicas de bombeo: .....	10
2.4 Propuestas para el cumplimiento de los objetivos del plan 20-20-20: .....	11
3. Estado del arte: .....	12
3.1 Análisis técnico e histórico de la energía hidráulica: .....	12
3.1.1 Tradición hidráulica en España: .....	13
3.1.2 Tipos de centrales hidráulicas: .....	14
3.2 La energía hidráulica en el mix energético nacional: .....	17
3.3 La energía hidráulica a nivel internacional: .....	20
3.4 Marco normativo, medioambiental y legal: .....	21
4. Potencial hidráulico.....	23
5. La dependencia energética española.....	30
6. Emisiones y residuos contaminantes debidos a la generación eléctrica:.....	33
6.1. La contaminación atmosférica:.....	34
6.2. Contaminantes secundarios: lluvia ácida y smog foto-químico .....	36
6.3. El calentamiento global, sus causas y efectos: .....	38
6.4. La contaminación radiactiva: .....	40
7. Residuos y emisiones en España:.....	42
8. Modelo de simulación:.....	47
8.1. Primera simulación: .....	50
8.2. Segunda simulación: centrales mini hidráulicas. ....	53
8.2.1. Escenario actual según el IDAE: primera hipótesis.....	54
8.2.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda hipótesis .....	55
8.2.3. Escenario probable para el 2030 con impulso del sector: tercera hipótesis	56
8.3 Tercera simulación: centrales de tipo fluyente. ....	57



8.3.1. Escenario actual según el IDAE: primera Hipótesis.....	59
8.3.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda Hipótesis.....	60
8.3.3. Escenario futuro de pleno desarrollo hidráulico: tercera Hipótesis.....	60
8.4 Cuarta simulación: centrales hidráulicas con capacidad de reserva .....	64
8.4.1. Escenario actual según el IDAE: primera Hipótesis.....	65
8.4.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda Hipótesis.....	65
8.4.3. Escenario futuro de pleno desarrollo hidráulico: tercera Hipótesis.....	66
8.5 Quinta simulación: .....	69
8.5.1 Escenario actual según el IDAE: primera Hipótesis.....	70
8.5.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda Hipótesis.....	71
8.5.3 Escenario futuro de pleno desarrollo hidráulico: tercera Hipótesis.....	73
9. Hidráulica de bombeo .....	81
10. Barreras al desarrollo hidráulico .....	86
11. Impacto medio ambiental de la energía hidráulica: .....	88
12. Conclusiones y actuaciones propuestas:.....	94
13. Bibliografía:.....	96





## **1. Introducción:**

El agua es un recurso vital para nuestro planeta, el 70% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua pero sólo el 3% de esta agua es dulce. Y de ese pequeño porcentaje del agua dulce que hay en la tierra sólo el 1% es superficial y nos permite aprovecharla de diversas formas. El resto del agua dulce está formada por aguas subterráneas y agua almacenada en los casquetes polares y glaciares.

Es debido a este pequeño porcentaje de agua dulce que hay en la tierra lo que lleva al ser humano a retenerla en embalses, permitiendo así su aprovechamiento para regar cultivos, abastecer de agua potable las ciudades y obtener energía eléctrica. Así es cómo surge la posibilidad de hacer del agua una importante fuente de generación eléctrica.

La energía hidráulica se basa en aprovechar la caída del agua desde cierta altura. La energía potencial, durante la caída, se convierte en energía cinética. El agua pasa por las turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que finalmente, se transforma en energía eléctrica por medio de los generadores. Es un recurso natural disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua, y una vez utilizada, es devuelta río abajo. Su desarrollo requiere construir pantanos, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad por lo que necesita una inversión elevada, sin embargo el peso de las consideraciones ambientales y el mínimo mantenimiento que necesitan una vez están en funcionamiento hacen que las centrales hidráulicas sean una de las fuentes de generación más utilizadas en el mundo entero.

La energía hidroeléctrica significa el 22% de toda la electricidad producida en el mundo, y según la Conferencia Mundial de la Energía, podría aumentar considerablemente para el año 2020, ya que muchos países se ven forzados a reducir sus emisiones contaminantes y a explotar más las fuentes renovables de energía.



## 2. Objetivos:

El aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos renovables debe ser una premisa para todos los países desarrollados, así como la reducción del empleo de derivados del petróleo que contaminan el planeta y son perjudiciales para la salud mientras que a su vez aumentan la dependencia energética del exterior.

Las políticas energéticas de los países desarrollados han vuelto a poner en actualidad la necesidad de explotar los recursos naturales y renovables de nuestro planeta de manera eficaz para así asegurar un futuro sostenible para nuestro planeta a la vez que se fortalece y asienta un sistema eléctrico capaz de complacer las demandas energéticas mundiales de la mejor manera posible.

En el mundo entero se está viendo un refloreCIMIENTO de una forma de generación que aunque limpia, eficaz y rápida se encontraba en un período de acusado declive: las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas, en sus diferentes formas (mini hidráulica, hidráulica de bombeo, grandes centrales...) están conociendo en los últimos años una revitalización por su interesante contribución al cumplimiento de los objetivos de la política energética mundial.

Los distintos objetivos que se van a tratar de abordar en este proyecto son los siguientes:

### **2.1 Determinar el potencial hidráulico explotable de manera sostenible en España:**

Para saber que peso puede llegar a tener la generación hidráulica en la producción eléctrica para un país como España es vital estudiar y evaluar el potencial hidráulico aún explotable en condiciones de sostenibilidad.

En este proyecto se evaluará el potencial hídrico explotable en condiciones de sostenibilidad, se comparará con el aprovechamiento actual que se hace en España de los recursos hídricos para la generación eléctrica y se indicará en que cuencas hídricas



se encuentra ese potencial, qué valor energético aproximado tiene y que tipo de central (mini hidráulica, de tipo fluyente o de reserva) es capaz de explotarlo de mejor manera.

## **2.2 Ventajas que un mejor y más eficiente aprovechamiento de los recursos hídricos podría traer a España:**

Se estudiará si es posible un mayor y más eficiente aprovechamiento hidráulico, en el cual la generación de energía hidroeléctrica pueda tener un mayor peso al actual en el mix energético nacional.

Se utilizará un complejo modelo de programación lineal para realizar simulaciones que traten de comprobar distintas hipótesis de como un mayor peso de la energía hidráulica en el mix pudiera ser beneficioso para un país como España.

Se analizará como distintos parámetros esenciales a la hora de definir la sostenibilidad de un sistema como son por ejemplo la dependencia energética del exterior o las emisiones debidas a la generación cambian con un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos. También se analizará como este aprovechamiento eficiente puede traer cambios positivos para la sociedad, ya que se comparará como el precio sombra de la electricidad varía dependiendo del distinto peso que tenga la generación hidráulica en la distribución energética nacional.

## **2.3 Centrales hidráulicas de bombeo:**

Las centrales hidráulicas de bombeo son a día de hoy la única forma de almacenar grandes cantidades de energía.

La hidráulica de bombeo puede ser esencial para mejorar la eficiencia del sistema eléctrico nacional y permitir la integración de la energía renovable no regulable.

En este proyecto se analizarán en profundidad los beneficios que la hidráulica de bombeo puede traer a un país como España y se determinará la previsión de potencia a instalar de esta forma de almacenamiento de energía.



## **2.4 Propuestas para el cumplimiento de los objetivos del plan 20-20-20:**

Se estudiará en este proyecto si un mayor aprovechamiento hidráulico permitiría a España cumplir los objetivos marcados por la Unión Europea en cuanto a materia medioambiental y energética en el plan 20-20-20. Este plan se basa en un paquete integrado de medidas propuestas por la UE sobre cambio climático y energía que prevé nuevos y ambiciosos objetivos para 2020. Con respecto a las cifras de 1990, los compromisos de la Unión Europea para lograrlo son:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 20% (30% si se alcanza un acuerdo internacional).
- Ahorrar el 20% del consumo de energía mediante una mayor eficiencia energética, además, en cada país el 10% de las necesidades del transporte deberán cubrirse mediante biocombustibles.
- Promover las energías renovables hasta el 20%. El objetivo del 20/20/20 para 2020 es llevar a Europa hacia el camino del futuro sostenible, con una economía que genere pocas emisiones de carbono y consuma menos energía.

En 2009, la energía renovable sobrepasaba el 7%. La UE se reserva el derecho de incluso intervenir en los planes que a partir de este año tiene que aprobar cada estado miembro, si considera que no son lo suficientemente sólidos como para alcanzar los objetivos.

## **2.5 Impacto medioambiental de la energía hidráulica:**

La generación de la energía hidroeléctrica proporciona una alternativa para la quema de combustibles fósiles, o a la energía nuclear, que permite satisfacer la demanda de energía sin producir agua caliente, emisiones atmosféricas, cenizas, desechos radioactivos o emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo la energía hidráulica tiene un impacto ambiental que hay que tratar de cuantificar, analizar, minimizar y evitar en la medida de lo posible. En este proyecto se tratará de estudiar el impacto que tiene para el medio



ambiente y la sociedad la construcción de infraestructura hidráulica y de cómo se pueden prevenir o reponer esos daños.

### **3. Estado del arte:**

#### **3.1 Análisis técnico e histórico de la energía hidráulica:**

La Energía Hidráulica está relacionada con el agua (del griego 'hidro'). Las caídas de masas de agua, producidas por los desniveles existentes en los cauces por donde estas aguas discurren, han sido utilizadas desde la antigüedad para producir energía mecánica por medio de ruedas de paletas y de cajones que, aunque eran artefactos rudimentarios, tenían aplicaciones tales como elevar agua de riego o mover molinos de grano. La bomba hidráulica es uno de los primeros artefactos más antiguos que se conocen, mientras que la noria y el tornillo de Arquímedes se emplean desde varios siglos antes de Jesucristo.

Antiguamente ya los romanos y griegos usaban la energía hidráulica para diversos fines como por ejemplo, moler trigo. Sin embargo la posibilidad de usar animales o esclavos retrasó su desarrollo generalizado hasta el siglo XII. Durante la edad Media las grandes ruedas hidráulicas podían proporcionar hasta cincuenta caballos de potencia, pero su uso se limitó a moler trigo hasta que con la Revolución Industrial, y especialmente a partir del S. XIX, comenzó a tener una gran importancia con la aparición de ruedas hidráulicas para la producción de energía eléctrica. Poco a poco la demanda energética de la población fue en aumento, y el bajo caudal del verano y otoño, unido a los hielos del invierno hizo que fuera necesario la construcción de grandes presas de contención para almacenar el agua durante todo el año. Esto provocó que las ruedas hidráulicas fueran sustituidas por máquinas de vapor en cuanto se pudo disponer de carbón.

La obtención de energía eléctrica a través del agua tuvo su mayor hito histórico con el ingeniero civil británico John Smeaton, quien construyó las primeras ruedas hidráulicas de hierro. Mientras que, también en Gran Bretaña, se construyó la primera central hidroeléctrica en Northumberland en el año 1880. El principal impulso de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad. A principios de la década de

los noventa, las primeras potencias productoras de energía hidroeléctrica eran Canadá y Estados Unidos.



Fig 1. Rueda hidráulica en Abarán.

### 3.1.1. Tradición hidráulica en España:

España es un país que desde mediados del siglo XX tuvo un gran impulso en la construcción de presas y embalses. En el año 2006 con razón del XXII congreso internacional de grandes presas se realizó un inventario de presas en España, que situaba el número de presas en 1.188, pero habiendo todavía 38 más en construcción. En España en los últimos 25 años se han construido y puesto en explotación más de 200 presas. Lo que significa que en España hay más de 18.000MW de potencia hidráulica instalada.

La capacidad embalsable de España es de 55.000 Hm<sup>3</sup> y aproximadamente un 40% de esa capacidad corresponde a embalses hidroeléctricos, siendo una de las proporciones más altas de Europa y del mundo.

### 3.1.2 Tipos de centrales hidráulicas:

Se define como Central Hidroeléctrica, al conjunto de las instalaciones requeridas para transformar la energía potencial de un curso de agua en energía cinética y a continuación en energía eléctrica disponible para el consumo.

El esquema de una central hidráulica convencional es el siguiente:

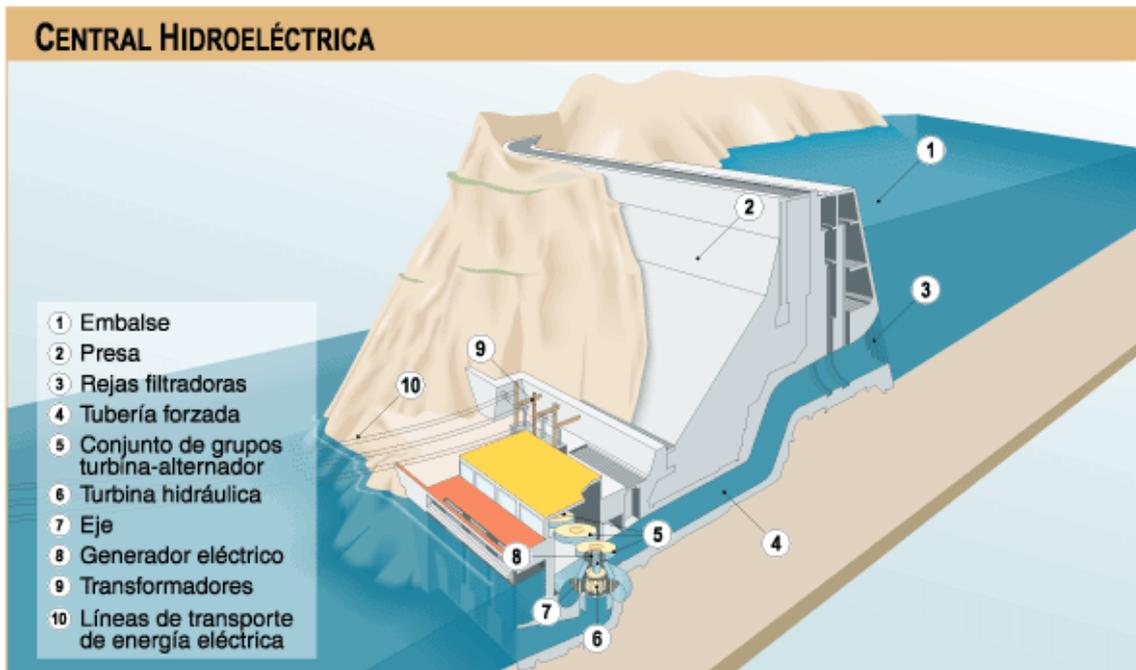


Fig 2. Esquema de una central hidráulica tradicional.

Las centrales hidráulicas se pueden clasificar de distintas maneras, una forma es atendiendo a su potencia instalada. Esta clasificación no es global pero en España a las centrales de menos de 10.000 kW se las denomina pequeñas centrales o mini hidráulicas mientras que las centrales con potencias instaladas mayores a los 10.000 kW se las conoce como medianas o grandes centrales.

También se puede clasificar las centrales dependiendo de cómo utilicen el agua:

#### 1. **Centrales de Agua Fluyente:**



Llamadas también de agua corriente. Es aquel aprovechamiento en el que se desvía parte del agua del río mediante una toma, y a través de canales o conducciones se lleva hasta la central donde será turbinada. Una vez obtenida la energía eléctrica el agua desviada es devuelta nuevamente al cauce del río.

Se construyen en los lugares en que la energía hidráulica debe ser utilizada en el instante en que se dispone de ella, para accionar las turbinas hidráulicas. No cuentan con reserva de agua, por lo que el caudal suministrado oscila según las estaciones del año. En la temporada de precipitaciones abundantes (de aguas altas), desarrollan su potencia máxima, y dejan pasar el agua excedente. Durante la época seca (aguas bajas), la potencia disminuye en función del caudal, llegando a ser casi nulo en algunos ríos en la época de estío.

Este tipo de centrales tiene un impacto medioambiental casi nulo durante su operación ya que el agua fluye río debajo de forma completamente natural sin ser acumulada en ningún embalse.

Su construcción se realiza mediante presas sobre el cauce de los ríos, para mantener un desnivel constante en la corriente de agua.



Fig 3. Central de río fluyente.

## 2. Centrales de Agua Embalsada:

Se alimenta del agua de grandes lagos o de pantanos artificiales (embalses), conseguidos mediante la construcción de presas. El embalse es capaz de almacenar los caudales de los ríos afluentes, llegando a elevados porcentajes de captación de agua en ocasiones. Esta agua es utilizada según la demanda, a través de conductos que la encauzan hacia las turbinas.

Su impacto ambiental es mayor en comparación con las presas de río fluyente ya que en este caso al embalsar el agua se alteran las condiciones naturales del cauce.

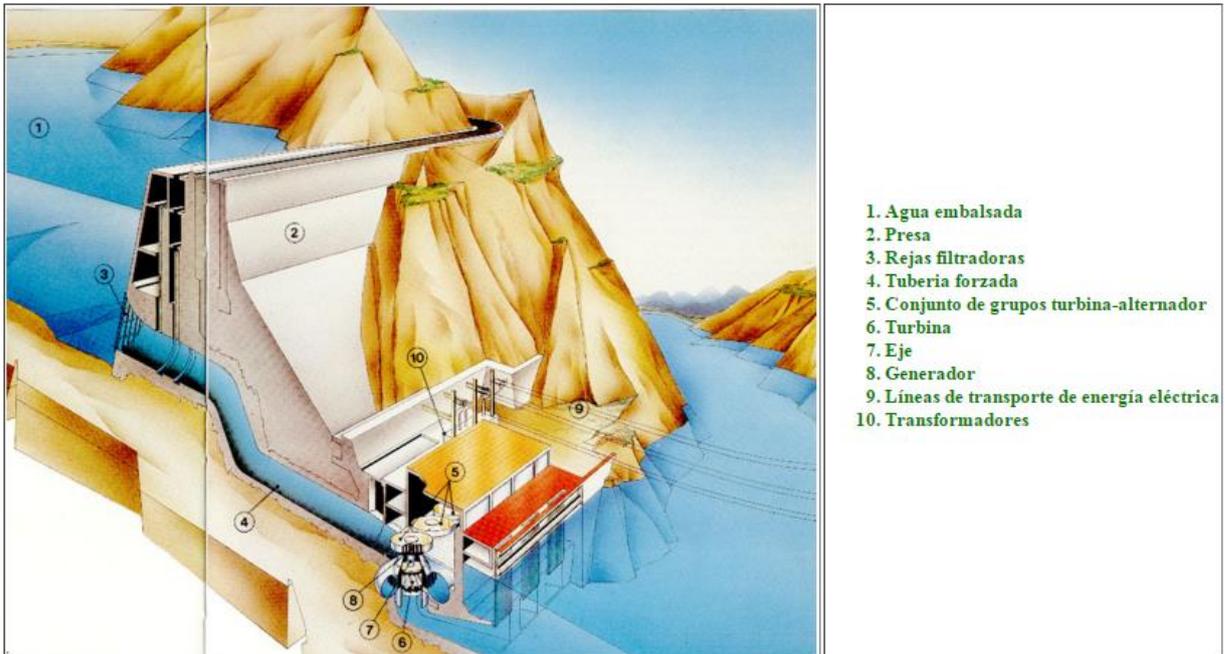


Fig 4. Central de agua embalsada.

### 3. Centrales de Regulación:

Tienen la posibilidad de almacenar volúmenes de agua en el embalse, que representan periodos más o menos prolongados de aportes de caudales medios anuales.

Prestan un gran servicio en situaciones de bajos caudales, ya que el almacenamiento es continuo, regulando de modo conveniente para la producción. Se adaptan bien para cubrir horas punta de consumo.

### 4. Centrales de Bombeo:

Estas centrales constan de dos embalses, uno superior y otro inferior y su funcionamiento básicamente consiste en turbinar agua del embalse superior al inferior para obtener energía y bombearla hacia arriba cuando sea económicamente rentable esta acción, es decir en los valles de la demanda. Este tipo de centrales es la única opción viable de almacenar grandes cantidades de energía a día de hoy. Por lo que su desarrollo está en pleno apogeo.

Pueden ser de dos tipos, de turbina y bomba, o de turbina reversible.

La alimentación del generador que realiza el bombeo desde aguas abajo, se puede realizar desde otra central hidráulica, térmica o nuclear.



Fig 5. Central hidráulica de bombeo.

### **3.2 La energía hidráulica en el mix energético nacional:**

La disponibilidad de energía constituye uno de los motores principales del desarrollo mundial, por lo que es vital garantizar su acceso a toda la población en condiciones económicamente apropiadas y de forma eficiente, especialmente a aquellos que no disponen de acceso a formas avanzadas de energía. Por otro lado, el uso predominante y masivo de recursos fósiles en la producción de energía representa una de las principales amenazas para la sostenibilidad del planeta por sus efectos sobre el cambio climático. Esta falta de sostenibilidad del modelo energético actual ha sido reiteradamente señalada por las principales instituciones relevantes, tanto del ámbito mundial como europeo. Es imprescindible pues avanzar hacia un modelo energético más sostenible.

Se considera un modelo sostenible aquel que contribuye al bienestar de la humanidad, mientras preserva los recursos ambientales y colabora con su justa distribución. Esto se



traduce en la práctica en un modelo energético compatible con la protección del medio ambiente, con precios de la energía asequibles que reflejen adecuadamente y de forma transparente los costes incurridos y que facilite el acceso a formas de energía modernas y limpias que impulsen la innovación. Esta definición de sistema sostenible es imposible que se cumpla si no existe una distribución energética donde las energías renovables tengan un peso considerable.

A principios del siglo XIX el 95% de la energía primaria que se consumía en el mundo procedía de fuentes renovables. Un siglo después tal porcentaje era del 38%, y a principios del presente siglo era sólo del 16%. Sin embargo, la tendencia está invirtiéndose, ya que en muchos países industrializados la proporción de energías renovables ha crecido de manera considerable en las dos últimas décadas.

En el 2015 España produjo el 37,4% de su energía eléctrica a través de fuentes renovables, un porcentaje que es algo inferior al de años anteriores como el 2014 ó 2013. Este decremento de la generación renovable difiere con los objetivos impuestos por la Unión Europea en materia medioambiental y energética para el año 2020.

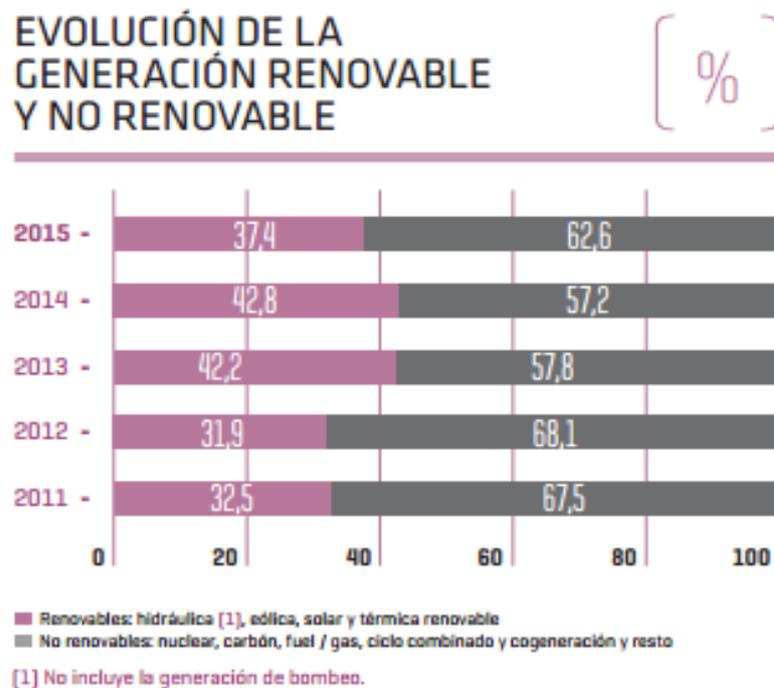


Fig. 6. Evolución de la generación renovable (%)



En España hay alrededor de 18.668 MW de potencia hidráulica instalados produciendo una energía anual de 25.733 GWh. Estos datos vistos en comparación a las otras fuentes de energía que se usan en España son bastantes llamativos. La potencia hidráulica instalada es un 20.2% de la potencia total, sin embargo, sólo cubre el 11.1% de la demanda anual de nuestro país, lo que implica que una fuente de energía limpia, renovable, y capaz de generar cuando sea preciso en cuestión de segundos, no está siendo explotada correctamente.

Otras fuentes de energía como el carbón o la nuclear tienen un peso muy diferente en el mix energético. La potencia nuclear instalada en España es el 7.7% de la potencia total, pero su aportación a la demanda anual media es del 21.7%, y el carbón cubre un 20.3% de la demanda siendo un 10.7% de la potencia instalada.

### POTENCIA INSTALADA A 31 DIC 2015

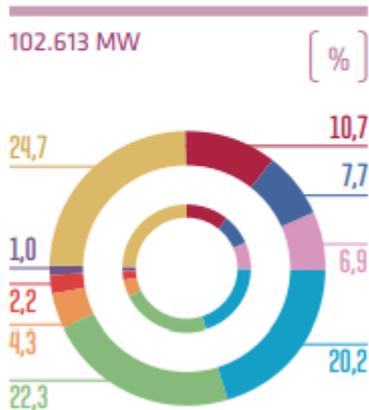


Figura 7. Potencia instalada en España (%)

### COBERTURA DE LA DEMANDA ANUAL

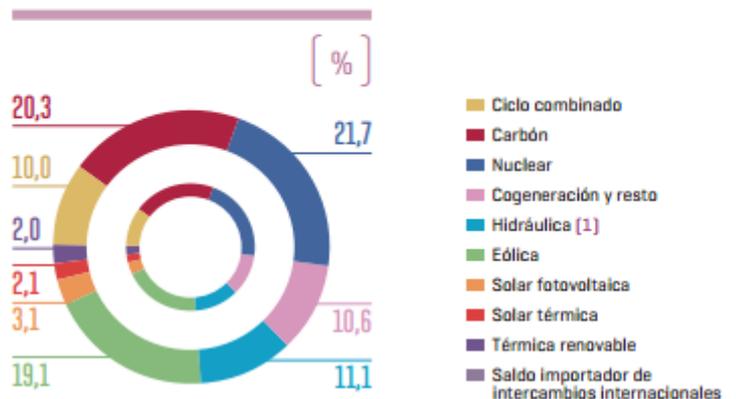


Figura 8. Cobertura de la demanda Anual (%)

Este mix energético, revela que España sigue produciendo mucha de su energía a través de fuentes de energía muy contaminantes o que generan residuos nucleares, y que además la materia prima necesaria es cara y se tiene que importar de otros países.

Es interesante analizar qué peso tiene la generación hidráulica en el resto del mundo y comparar esos valores con los del mix energético nacional y estudiar si otro mix



energético con mayor peso de la generación hidráulica pudiera darse en España y que consecuencias tendría eso para la sociedad y el sistema eléctrico español.

### **3.3 La energía hidráulica a nivel internacional:**

La energía hidroeléctrica significa el 22% de toda la electricidad producida en el mundo, pero el mundo todavía dista mucho de poder conseguir cotas importantes de energías renovables en su producción de energía primaria, sin embargo muchos países han dado ya pasos importantes para que la proporción de energías limpias en su mix energético sea mayoritaria. Hay ya varios países que cubren la mayoría de su demanda eléctrica a través de generación renovable, siendo la generación hidráulica la predominante en esas distribuciones.

El objetivo de cubrir la demanda energética de un país íntegramente con energía renovable ha dejado de ser un mito inalcanzable y hoy son numerosos los países que pueden presumir de estar en el umbral de este ambicioso objetivo.

Costa Rica confirmó que en 2015 generó el 99% de su electricidad con fuentes renovables. En su caso, como en la mayoría de los países de este selecto club, la energía hidroeléctrica es la que contribuye mayoritariamente para la consecución de este registro. En concreto, con un 75,3% de la producción eléctrica total. Esta marca supone todo un hito histórico, pero no se trata de un caso aislado. Hay más países, casi todos en zonas del planeta con mucha riqueza hídrica, que rozan la meta del 100% renovable. Este es el caso de Paraguay, cuya cuota de renovables es del 99,6%, abasteciéndose casi exclusivamente de tres centrales hidroeléctricas: Itaipú, que vuelve a ser la central que más electricidad produce en el mundo, al lograr una producción de 89,2 millones de MWH en 2015, y las de Acaray y Yacyretá.

Uruguay con una población de 3,4 millones de habitantes alcanzó en 2015 una cuota del 94% de renovables en su mix eléctrico. La marca se logró con un 74% de hidráulica, y se explica por un año récord en energía hidráulica.

Islandia ofrece otro ejemplo similar. El país genera hoy el 100% de su electricidad con energías renovables: un 75% producido por grandes centrales hidroeléctricas, y un 25% de energía geotérmica.



Albania ha explotado alrededor del 30 – 35% de su potencial hidroeléctrico. De acuerdo con la Agencia de Inversión y Desarrollo de Albania (AIDA) la capacidad instalada en la actualidad de energía hidráulica en el país es de aproximadamente 1.446 MW, distribuidos entre 11 grandes y medianas centrales hidroeléctrica y 83 instalaciones de mini hidráulica, que generan el 98% de la producción total de electricidad del país.

La lista de los países que están en los umbrales del objetivo 100% renovables es mucho más amplia. Nicaragua, acaba de aprobar un objetivo de renovables del 90% para dentro de cuatro años. República Democrática del Congo, Etiopía o Nepal también se encuentran con mix eléctricos con una muy alta cuota de renovables y, en especial de hidráulica.

Es posible alimentar un país con un mix energético mayoritariamente renovable, y este hecho no afecta negativamente a la calidad del servicio ya que se da la circunstancia de que Costa Rica ocupa el segundo lugar de América Latina -tras Uruguay- en calidad de servicio de electricidad con una cobertura del 99,4 % de todos los hogares, según el Índice de Competitividad Global.

La energía hidráulica, sin duda, se configura como la clave mundial, hoy por hoy, para obtener distribuciones de producción energéticas renovable y sostenibles.

### **3.4 Marco normativo, medioambiental y legal:**

A continuación se citan las normativas y legislaciones actuales que regulan la energía hidráulica, el medio ambiente y las concesiones del agua española que incumben en este proyecto:

#### Cronología legal sobre la hidroelectricidad.

-O.M. del Ministerio de Industria de 23 de febrero de 1.949 sobre el Reglamento de centrales, líneas y estaciones transformadoras. (BOE 23.49).

-Decreto 3.151/68 de 28 de noviembre, Reglamento de líneas eléctricas de alta tensión (BOE 27.12.68). -Decreto 2.413/73 de 20.9 aprueba el Reglamento electrotécnico de baja tensión (BOE 9.10.73).



- Real Decreto 2.2295/85 de 9 de octubre de 1.985, por el que establece la adición al artículo 2º del Reglamento electrotécnico de baja tensión (BOE 12.12.85).
- Publicación del MOPU reguladora de las pequeñas centrales hidroeléctricas.
- Real Decreto 453/89, de 21 de abril que regula las instalaciones de producción que forman parte del sistema eléctrico nacional. (BOE 9.5.89).
- O.M. de Industria de 16 de mayo del 1994, que adapta la ITC MIE-RAT 02 del Reglamento de Centrales eléctricas, subestaciones y Centros de Transformación (BOE 2/6/94).
- R.D. 1217/81 de 10 de abril para el fomento de la producción hidroeléctrica en Pequeñas Centrales (BOE 24.6.81).
- O.M: de 28 de julio de 1982, por la que se desarrolla el R.D. 1217/81, de 10 de abril, para el fomento de la producción hidroeléctrica en Pequeñas Centrales. (BOE 5.8.82).
- O.M. de 5.5.1983, por la que se modifica el apartado 9' a) de la OM de 28.7.1982, que desarrolla el R.D. 1217/81 de 10 de abril para el fomento de la producción hidroeléctrica en Pequeñas Centrales. (BOE 11. 5.8 3).
- O.M. de 17.5.83, por la que se modifica el apartado 20 de la OM de 28.7.82, que desarrolla el R.D. 1217/81 de 10.4. Para el fomento de la producción hidroeléctrica en Pequeñas Centrales (BOE 20.5.83).

El Medio Ambiente está regulado por las siguientes normas:

- Directiva 78/659 de 18 de julio del 1978, que regula la calidad de las aguas continentales para ser aptas para la vida de los peces. (DOCE 14 de agosto).
- O.M. MOPU de 16 de diciembre del 1988, que señala los métodos y frecuencias de análisis de aguas que requieran protección para la vida piscícola. (BOE 22.12.88).  
Publicación del MOPTMA sobre gestión de Directivas de la CEE sobre Medio Ambiente:
- Protección de aguas.
- Aguas continentales

Concesiones:

Concesiones de Aguas Públicas en la nueva Ley de Aguas. La Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (B.O.E. 8.8.85), y el R.D. 849/86, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico que la desarrolla (B.O.E. 30.4.86),



establecen el carácter público del agua sea cual sea su origen, superficial o subterráneo, constituyendo un recurso unitario, subordinado siempre al interés general. Las concesiones de aguas públicas han sido ampliamente reguladas en dichas disposiciones, introduciéndose cambios importantes con respecto a la legislación anterior.

#### **4. Potencial hidráulico**

Son muchos los países que generan la mayoría de su electricidad a través de los recursos hídricos, y para saber de qué manera se pueden explotar estos recursos hay que determinar cuál es el potencial hidráulico de ese país. Por lo que si se quiere estudiar en qué medida se podrá incrementar la producción hidráulica en España hay que estudiar el potencial aún explotable. Este potencial no solamente depende de las consideraciones geográficas o ambientales, sino también está supeditado a la reducción de la disponibilidad de agua en el futuro como consecuencia del cambio climático, que ocasionará según los expertos una reducción de las lluvias y un aumento de la temperatura media de España.

La evaluación del potencial total de cada fuente de energía renovable es una labor compleja dada la diversa naturaleza de estos recursos. Para la elaboración del plan de energías renovables 2011-2020 del IDAE que se ha utilizado en este proyecto, se han realizado un buen número de estudios para evaluar el potencial de la mayor parte de las energías renovables. Estos estudios están disponibles en la página web del IDAE. La principal conclusión de estos estudios es que el potencial de las energías renovables en España es amplísimo y muy superior a la demanda energética nacional y a los recursos energéticos de origen fósil existentes. Por lo que se podría decir que las energías renovables son el principal activo energético de nuestro país, pero sin embargo como ya se ha visto no se están aprovechando de manera eficiente.

Para que sea posible un mix energético donde la energía hidráulica tenga más peso es necesario estudiar el potencial hídrico español que aún puede ser explotado, es decir, si todavía es posible obtener más energía del agua de la que se obtiene hoy por hoy en España.

España tiene un elevado potencial hidroeléctrico, gran parte del cual ha sido ya desarrollado a lo largo de más de un siglo, dando como resultado un importante y



consolidado sistema de generación hidroeléctrica altamente robusto. La última evaluación de los recursos hidráulicos nacionales fue realizada en el año 1980 en un estudio sobre el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico con centrales de pequeña potencia. La metodología utilizada consistía en determinar el potencial bruto o energía que sería capaz de generar el agua en su descenso por los ríos, al que se le descontaba la energía perdida por escorrentías, rendimientos hidráulicos, mecánicos, caudales ecológicos, etc., obteniendo el potencial técnicamente desarrollable y a partir de este el potencial de futura utilización, una vez descontado el potencial desarrollado hasta esas fechas. El siguiente cuadro recoge los valores obtenidos del estudio y la distribución geográfica del potencial hidroeléctrico, clasificado por las antiguas cuencas hidrográficas:

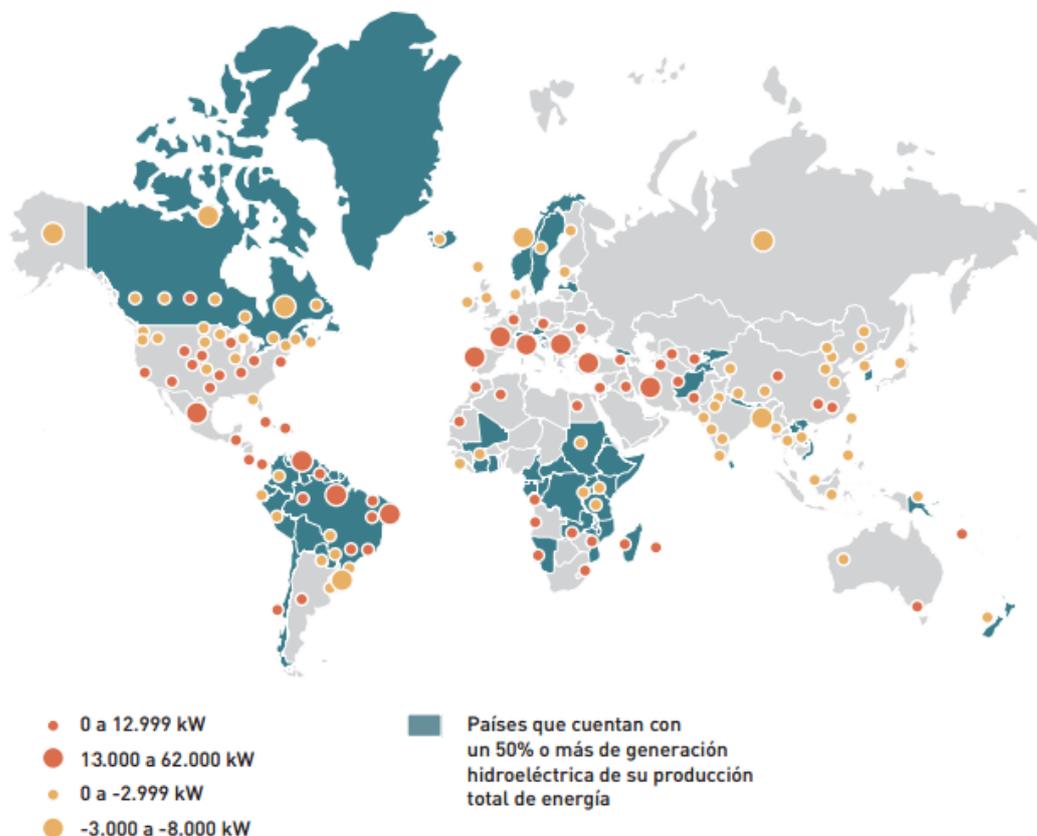
Potencial hidroeléctrico en España (GWh/año)						
Cuenca	Potencial actualmente desarrollado	Potencial de futura utilización			Total potencial técnicamente desarrollable	Potencial fluvial bruto
		Aprovecham. medianos y grandes	Aprovecham. pequeños	Total		
Norte	10.600	9.300	2.700	12.000	22.600	34.280
Duero	6.700	4.200	600	4.800	11.500	29.400
Tajo	3.900	4.200	600	4.800	8.700	16.540
Guadiana	300	300	-	300	600	3.830
Guadalquivir	400	500	300	800	1.200	10.410
Sur de España	200	100	300	400	600	2.740
Segura	100	600	100	700	800	2.090
Júcar	1.200	1.000	400	1.400	2.600	7.490
Ebro	7.600	7.000	1.400	8.400	16.000	40.060
Pirineo Oriental	600	100	300	400	1.000	3.520
<b>Total cuencas</b>	<b>31.600</b>	<b>27.300</b>	<b>6.700</b>	<b>34.000</b>	<b>65.600</b>	<b>150.360</b>

Fuente: INTECSA-IDAE (1980)

Fig. 9 Potencial hidroeléctrico en España (GWh/año)

Del cuadro anterior se extraía que el potencial de futura utilización con pequeñas centrales (en los años 80, se consideraban las centrales menores de 5.000 kW) era de 6.700 GWh/año y con aprovechamientos medianos y grandes era de 27.300 GWh/año, es decir, que en 1980 todavía quedaba más de la mitad del potencial hidráulico por

explotar. Desde esa fecha hasta la actualidad se han desarrollado parte de esos recursos, concretamente los proyectos de puesta en marcha de pequeñas centrales hidroeléctricas que han supuesto un potencial de 4.500 GWh, por lo que teóricamente el potencial hidroeléctrico pendiente de desarrollar sería de 2.200 GWh para pequeñas centrales. No obstante, calcular los volúmenes de energía hidroeléctrica que estarán disponibles en el futuro es una tarea cada vez más compleja, ya que gran parte de los antiguos métodos utilizados con este fin resultan hoy inviables por temas medioambientales y por otros factores no considerados en esos momentos como los efectos del cambio climático. Un informe elaborado por IEEE Spectrum, medio especializado que pertenece al Institute of Electrical and Electronics Engineers (USA), que recoge el trabajo de ingenieros y expertos en todo el planeta, esboza un posible panorama sobre la realidad del sector hidroeléctrico dentro de 40 años. En el siguiente mapa se plasma el resultado de esta investigación, titulada Cambios previstos en la producción hidroeléctrica al 2050, donde se muestran las áreas críticas y los sectores con mayor potencial en cuanto a generación hidroeléctrica en todo el mundo.



Fuente: Norwegian University of Science and Technology

Fig. 10 Estimación de la producción hidroeléctrica para el 2050.



Del anterior estudio se pueden extraer varias ideas principales, y es que en un futuro no muy lejano la producción energética a través de centrales hidráulicas será mayor del 50% de la producción energética total de muchos países tales como Canadá, Noruega, Suecia, Malí o Nueva Zelanda, pero que en muchos países desarrollados como por ejemplo España, Francia, Alemania e Italia la producción de energía hidráulica aumentará considerablemente. Lo que significa que la dinámica mundial es ir poco a poco produciendo más energía a través de fuentes limpias y renovables.

Parece ser que España tiene todavía bastante margen para aprovechar el potencial hídrico que posee, pero estos datos tomados hace tiempo no tenían en cuenta factores que pueden ser determinantes como el cambio climático, por lo que es de vital importancia realizar nuevos estudios con técnicas novedosas que permitan obtener unas referencias más actuales y fiables.

Se obtendrá el potencial hidráulico todavía por desarrollar en España de manera más exacta que en el anterior estudio ya que se analizará como el cambio climático podría llegar a afectar a los recursos hídricos mundiales.

Entre los resultados más llamativos destaca el hecho de que las zonas de latitudes medias en general experimentarán reducciones en el caudal de sus ríos, y por consiguiente, en su producción hidroeléctrica. Sin embargo, otras áreas, como por ejemplo el Norte de Europa, el Sudeste Asiático o África Oriental, registrarán aumentos en sus caudales fluviales. En el caso concreto de España, el clima es enormemente variante debido a su compleja topografía y situación geográfica. Desde el siglo XX, las temperaturas en España han aumentado, y lo han hecho en magnitud superior a la media global. Las precipitaciones durante este periodo han tendido a la baja, sobre todo, en la parte meridional y las Islas Canarias, aunque en general estos datos tienen una alta variabilidad, por lo que es difícil extraer conclusiones claras. Todos los estudios y análisis científicos relativos a cómo serán los impactos del cambio climático en España apuntan a una disminución general de los recursos hídricos.

Las principales conclusiones obtenidas de la "Evaluación preliminar de los Impactos en España por Efectos del Cambio Climático" (realizado por la Oficina del Cambio Climático del MARM, 2005) sobre los recursos hídricos son:



- El cambio climático, con el aumento de la temperatura y, en España, una disminución de las precipitaciones, causará una disminución de aportaciones hídricas.
- La sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de la temperatura y disminución de precipitación es muy alta, sobre todo en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas (las zonas más críticas son las semiáridas).
- Los recursos hídricos sufrirán en España disminuciones importantes como consecuencia del cambio climático. Para el horizonte de 2030, simulaciones con aumentos de temperatura de 1 °C y disminuciones medias de precipitación de un 5% ocasionarían disminuciones medias de aportaciones hídricas en régimen natural de entre un 5 y un 14%.
- Junto la disminución de los recursos se prevé un aumento de la variabilidad interanual de los mismos. El impacto se manifestará más severamente en las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares.

A pesar de los datos mencionados la disminución de los recursos hídricos en estas cuencas no será tan negativo como se puede llegar a pensar para la generación hidráulica, ya que estas cuencas tiene una potencia actualmente desarrollada muy baja en comparación con lo que hay en otras cuencas hidrográficas y su posible potencial aún por explotar es también muy bajo. Analizando numéricamente el potencial de estas cuencas obtenemos los siguientes resultados:

La cuenca hidrográfica del Guadiana representa menos de un 1% del potencial de generación instalado actualmente, mientras que la cuenca del Segura y el Júcar representan un 0.3% y un 4% respectivamente, unos porcentajes que en comparación con las demás cuencas hidrográficas son prácticamente despreciables.

Esta futura disminución de las aportaciones hidrológicas de los ríos afectará a la producción hidroeléctrica, sobre todo a la de tipo fluyente sin capacidad de regulación, y se traducirá en una disminución en las horas equivalentes de funcionamiento. Por lo que las iniciativas futuras a desarrollar deberán tener en cuenta estos factores a la hora de dimensionar los nuevos proyectos en cuanto a la definición de los caudales de equipamiento y cambiar la filosofía de utilizar series hidrológicas muy largas, como se hacía en el pasado.

A continuación, se describen los dos tipos de escenarios (actual y óptimo) utilizados para el análisis del potencial hidroeléctrico desarrollable al año 2020, con las siguientes hipótesis y actuaciones posibles futuras:

	Hipótesis	Actuaciones
<b>Escenario actual</b>	<p>Sin mejorar el procedimiento de tramitación concesional (sigue vigente): plazo promedio de resolución más de 5 años</p> <p>Negativa al desarrollo del potencial fluyente en cauce de ríos, por principio de no deterioro de la Directiva Marco de Aguas (DMA)</p> <p>Eliminación de minicentrales en desuso</p>	<p>Ampliación de la capacidad de bombeo de las centrales existentes (no nuevas) por requerimientos del sistema</p> <p>Desarrollo del potencial hidroeléctrico "solo" en infraestructuras existentes (CCHH pie de presa/canal de riego) y repotenciación de centrales existentes</p>
<b>Escenario óptimo</b>	<p>Que exista nueva reglamentación de procedimiento de tramitación concesional, armonizado con la regulación vigente en materia de energías renovables (Objetivo UE 20-20-20)</p> <p>Establecimiento de "ventanilla única" para las solicitudes, de forma que el plazo de resolución máximo fuera de un (1) año</p>	<p>Máximo desarrollo centrales de bombeo puro para permitir la mayor penetración de la renovable no gestionable (ampliaciones y nuevas)</p> <p>Desarrollo del potencial hidroeléctrico de tipo sostenible: infraestructuras existentes del estado, turbinación caudales ecológicos o ambientales, rehabilitación de centrales abandonadas y nuevas centrales fluyentes de mínimas afecciones medioambientales</p> <p>Ampliación y repotenciación de centrales existentes</p>

Los objetivos del potencial hidroeléctrico a desarrollar para el escenario óptimo, teniendo en cuenta las hipótesis y actuaciones antes consideradas serían los siguientes:

	Potencia desarrollada (MW)	Incremento potencia (MW)	Previsión potencia 2020 (MW)
Hidráulica > 50 MW (R.O.)	10.900	1.000	11.900
Bombeo puro	2.700	6.150	8.850
Hidráulica(10-50 MW) (R.O.+ R.E.)	3.100	500	3.600
Minihidráulica (<10 MW) (R.E.+ R.O.)	1.900	700	2.600
<b>Total</b>	<b>18.600</b>	<b>8.350</b>	<b>26.950</b>



Los objetivos del potencial hidroeléctrico a desarrollar para el escenario actual, teniendo en cuenta las hipótesis y actuaciones antes consideradas serían los siguientes:

	Potencia desarrollada (MW)	Incremento potencia (MW)	Previsión potencia 2020 (MW)
Hidráulica > 50 MW (R.O.)	10.900	500	10.900
Bombeo puro	2.700	3.500	5.700
Hidráulica(10-50 MW) (R.O.+ R.E.)	3.100	300	3.300
Minihidráulica (<10 MW) (R.E.+ R.O.)	1.900	300	2.200
<b>Total</b>	<b>18.600</b>	<b>4.600</b>	<b>22.100</b>

En resumen, todavía queda mucho potencial hidroeléctrico por ser desarrollado en España bajo criterios de sostenibilidad, y en cualquiera de los dos escenarios mencionados se prevé un incremento de la potencia hidráulica instalada que va desde los 4600 MW hasta los 8350 MW para el 2020.

Este incremento de la potencia hidráulica instalada implica un aumento de la mini hidráulica de unos 500MW, cuando se ha visto que el potencial aún desarrollable para estas pequeñas centrales es más de diez veces mayor.

Como se acaba de ver es posible obtener más energía del agua de la que se está obteniendo ahora mismo en España. ¿Pero de verdad es algo necesario?

A continuación se va a analizar la dependencia energética nacional y se obtendrán conclusiones de cómo esta necesidad del exterior afecta a España en diversos factores y si una más eficiente explotación de los recursos hídricos podría favorecer en alguna medida a España.



## 5. La dependencia energética española.

La dependencia energética de un país se puede entender como la necesidad que tiene un determinado país del exterior para poder tener energía para su consumo. Es decir, de toda la energía que se consume en un país, cuanta de esa energía es generada por el propio país y cuanta es importada (ya sea mediante la importación directa de energía eléctrica o a través de la compra de materias primas para su producción).

En el caso de España, la cifra de dependencia energética está cerca de ser alarmante, y es que ésta es mucho más alta que la de la media europea. En el 2014 la dependencia fue del 86,06% y en el 2015 esta cifra no se ha reducido prácticamente. Esto quiere decir que por cada diez unidades energéticas que se consumen en España hay que pagar 8.6 de ellas a otros países, lo que es un auténtico despropósito, ya sea por el dinero que cuesta como por la inestabilidad que puede suponer depender tanto de terceros.

Esta elevada dependencia se basa básicamente en la escasez nacional de yacimientos de materias primas tales como el petróleo, o el gas. Y aunque haya minas de carbón, el carbón español es de baja capacidad calorífica y contiene muchos sulfuros por lo que prácticamente el 88% del carbón que se consume en España es de importación extranjera. En definitiva, la escasa presencia de yacimientos de energía primaria fósil ha supuesto históricamente una elevada tasa de dependencia energética en España. Esta mayor dependencia introduce fuentes de riesgo adicionales sobre los procesos productivos, como los relacionados con la garantía del suministro energético o con la volatilidad de los precios de los mercados internacionales ya que los países a los que se les compra el gas o el petróleo son a veces, países con situaciones políticas algo inestables.

España es el segundo país de la Unión Europea con mayor dependencia energética, sólo superada por Italia (entre los grandes consumidores), este dato choca mucho con la idea de que para el 2020 España pueda producir el 20% de la energía que se consume en sus fronteras a través de fuentes renovables.

La Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad de Comillas lleva realizando desde el año 2002 estudios y análisis de datos oficiales sobre la situación energética española. Las conclusiones obtenidas de su Observatorio 2015 de Energía y sostenibilidad no dan lugar al optimismo. Según la gran mayoría de indicadores, el sistema energético español sigue tendiendo a una senda de menor sostenibilidad: el consumo de energía final sigue



creciendo; las emisiones de CO<sub>2</sub> también aumentan; la dependencia energética, lejos de disminuir sigue agigantándose y algunos precios energéticos domésticos también suben.

El informe también recogió datos que invitan al optimismo ya que se constata una bajada de emisiones de otros contaminantes como el NO<sub>x</sub> y el SO<sub>2</sub>. Estos gases son los que tienen una mayor contribución al efecto invernadero y son muy nocivos para la salud.

Otro de los datos destacables es el aumento del 18% en el uso de carbón, frente a la bajada del 9% de consumo de gas natural, que ha sido compensado por un buen año hidráulico y el ascenso en la utilización de la energía solar. La Catedra también lamentó el hecho de que la inversión en renovables se haya desactivado en los últimos años e indicó que España ha pasado de ser un país líder en energía renovable a que la UE nos avise de que no se están cumpliendo los objetivos marcados para el 2020. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, los autores del Observatorio coinciden en que el modelo energético español continúa presentando importantes desafíos respecto a la eficiencia económica, la dependencia energética exterior o al impacto medioambiental, y solicitan la puesta en marcha de una política energética estable, que proporcione señales adecuadas a los agentes, y que contribuya a avanzar hacia la sostenibilidad del sector.

Para España, después de lo que se acaba de ver, resulta todavía más apremiante y estratégico avanzar con paso firme en la idea de mediante la transformación del modelo energético llegar a un nuevo "mix" energético, en el que el papel de las renovables sólo puede ser creciente a medio y largo plazo. El desarrollo de las energías renovables debe ser una apuesta prioritaria en la política energética española. Las energías renovables tienen múltiples efectos positivos sobre el conjunto de la sociedad: entre otros, la sostenibilidad de sus fuentes, la reducción en las emisiones contaminantes, el cambio tecnológico, la posibilidad de avanzar hacia formas de energía más distribuidas, la reducción de la dependencia energética y del déficit de la balanza comercial, el aumento del nivel de empleo y el desarrollo rural.

Actualmente el 51.44% de la energía que se consume en España se importa en forma de petróleo crudo o sus derivados, este porcentaje es demasiado alto para un país como España ya que puede ser muy arriesgado tanta dependencia de una fuente que tiene un precio tan volátil y que su esperanza de vida es relativamente corta en comparación con otras materias energéticas. Bien es cierto que esta dependencia tan elevada del petróleo es básicamente debido a otros usos de esta materia como el sector transportes o la



industria ya que solo el 4.15% del petróleo importado se usa para la generación de electricidad, haciendo que el 5.57% de la energía eléctrica generada tenga su origen en el crudo u otros derivados.

Antes de entrar en profundidad en un análisis de como el precio del petróleo va a cambiar en los años venideros, hay que mencionar que las formas de aprovechamiento de esta materia son extremadamente ineficaces, contribuyendo con su uso a que las pérdidas energéticas de España se sitúen en el 31.68%, una cifra muy alta si se pone en contexto del objetivo pedido por la UE para el año 2020. (Uno de los objetivos propuestos consistía en situar las pérdidas energéticas en el 20%).

Según los expertos en la materia, se prevé que la producción de petróleo convencional se mantenga constante hasta el año 2035, donde la producción comenzará a bajar hasta los 68 millones de barriles diarios (Actualmente la producción ronda los 90 millones de barriles diarios), por lo que se deberá empezar a buscar sustitutivos alternativos para cubrir la demanda de petróleo.

El mismo estudio anterior, estima que el precio del gas natural en España va a experimentar un aumento del precio hasta llegar a los 27 €/MWh en el año 2020. Esta estimación de los precios energéticos en el futuro es una cuestión clave para evaluar la competitividad de las energías renovables y para cuantificar el esfuerzo económico que supone la consecución de los objetivos que se proponen en el plan 20/20/20 o en futuros planes que la UE impondrá.

A la luz de las perspectivas inciertas en el sector energético a nivel mundial y al papel fundamental que juega la energía en el desarrollo de las sociedades modernas, la política energética se debe desarrollar alrededor de tres ejes: la seguridad de suministro, la preservación del medio ambiente y la competitividad económica. Para cumplir con estos requerimientos de la política energética la mayoría de los países desarrollados aplican dos estrategias, fundamentalmente: la promoción del ahorro y la mejora de la eficiencia energética, por un lado, y el fomento de las energías renovables, por otro.

Por ser fuentes energéticas autóctonas, la introducción de las energías renovables mejora la seguridad de suministro al reducir las importaciones de petróleo y sus derivados y de gas natural, recursos energéticos de los que España no dispone, o de



carbón, fuente energética de la que se cuenta con recurso autóctono. En cuanto a la afectación ambiental de las energías renovables, está claro que tienen unos impactos ambientales mucho más reducidos que las energías fósiles o la nuclear, especialmente en algunos campos como la generación de gases de efecto invernadero o la generación de residuos radiactivos y, por lo tanto, su introducción en el mercado da plena satisfacción al segundo eje de la política energética antes mencionado. Sin embargo, esto no significa que las energías renovables no tengan impactos ambientales de carácter más local. Habrá que tener en cuenta estas afectaciones en el desarrollo de los objetivos propuestos en este plan.

La introducción de las energías renovables debe descansar en la optimización de nuestra demanda energética. Debemos ser capaces de desarrollarnos de una manera que provoque unas menores necesidades energéticas y debemos usar la energía (todas las fuentes energéticas a nuestra disposición) con la mayor eficiencia posible.

Estas premisas provocan que un estudio como el que se está haciendo en este proyecto, donde se analiza en profundidad los recursos hídricos nacionales y de qué manera optimizar su aprovechamiento y minimizar su impacto medioambiental, sea algo esencial para el correcto desarrollo energético español, entendiendo correcto como un desarrollo limpio, eficiente y económico para los habitantes de España.

## **6. Emisiones y residuos contaminantes debidos a la generación eléctrica:**

Como subproducto de las actividades de producción de energía se generan contaminantes que afectan a la atmósfera, la hidrosfera, el suelo y los seres vivos. Estas emisiones contaminantes tienen una doble naturaleza. Por un lado existe una contaminación inherente a la operación normal de los sistemas de producción y por otro una contaminación producida, en situaciones catastróficas de carácter accidental. Ambas deben ser valoradas y reducidas hasta niveles asumibles en términos medioambientales y socioeconómicos.

En esencia, se trata de implementar tecnologías que permitan reducir la contaminación en origen, estudiar su impacto sobre el medio y la capacidad de éste para diluir, transferir y asimilar esta contaminación, determinando los límites por encima de los cuales los



efectos pueden llegar a hacerse irreversibles. Al tiempo se debe intentar diseñar estrategias que permitan la recuperación del medio ambiente de los daños causados.

A continuación se van a analizar y clasificar los distintos contaminantes o residuos que emiten o producen las distintas fuentes de generación energética, se va a estudiar cómo afectan al medio ambiente y a las personas y se va a tratar de medir y cuantificar los costes externos asociados a las distintas emisiones.

Finalmente se tratará, a través del modelo de simulación, encontrar un mix energético que pueda cubrir la demanda de manera eficaz mientras emite lo mínimo posible de gases de efecto invernadero y sea económicamente sostenible.

### 6.1. La contaminación atmosférica:

La atmósfera está compuesta por una mezcla de gases: nitrógeno (78%), oxígeno (21%), dióxido de carbono (0,04%) y otros gases inertes, en pequeñas proporciones, como el helio, neón, argón, xenón y kriptón. También existen cantidades de metano (CH<sub>4</sub>) y otras variables de vapor de agua.

La atmósfera se divide en capas esféricas a partir de la distribución vertical de la temperatura, con sus cimas marcadas por pausas:

- Troposfera.
- Estratosfera.
- Mesosfera.
- Termosfera.

Los agentes contaminantes presentes en la atmósfera pueden ser de origen tanto natural como artificial. Es importante hacer esta distinción ya que hay muchos focos de contaminación de origen natural que no se pueden evitar. Entre estos focos naturales destacan los producidos por las emisiones de polvo y gases de los volcanes, los incendios forestales naturales, o las partículas salinas dispersas por las tormentas. Aunque la contaminación de origen natural exista y haya que tenerla en cuenta lo cierto es que la forma de contaminación que más efecto tiene en la atmósfera, y por lo tanto, la que se va a analizar en este proyecto es la de origen antropogénico.

La gran atención que se le debe prestar a la contaminación atmosférica viene dada por dos motivos principales; por un lado su impacto sobre el clima, contribuyendo al efecto



invernadero, que a su vez influye en el aumento de la temperatura media del planeta, y por otro lado por su comportamiento como vehículo transmisor de contaminantes a otras regiones y otros medios como el suelo o el agua.

El mayor impacto, y el que más preocupa globalmente, es el causado por la emisión a la atmósfera de los gases producidos en la combustión de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas).

Se va a analizar lo que podrían ser los distintos tipos de contaminantes y sus consecuencias en la atmósfera de una central térmica de carbón:

- Gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
- Monóxido de carbono: CO.
- Gases precursores de la lluvia ácida: dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )
- Vapor de agua.
- Partículas, incluyendo en ocasiones metales pesados.
- Compuestos orgánicos.

La emisión a la atmósfera de partículas y metales pesados es realmente peligroso para los seres humanos ya que los metales pesados son bioacumulativos y pueden provocar enfermedades o incluso envenenamiento. Los más peligrosos son el mercurio y el Plomo.

Del mismo modo, la combustión del petróleo y sus derivados, como la gasolina o el gasóleo, generan unos resultados que se asemejan a los del carbón. En ellos se puede disminuir sensiblemente la proporción de azufre, para reducir la emisión de  $\text{SO}_2$  pero el nivel de Nitrógeno es mayor. Igualmente es posible reducir el contenido de metales pesados, como el plomo, presente en las gasolinas utilizadas en el transporte terrestre.

Las emisiones producidas por la quema de la madera se parecen a las del carbón y aunque su uso ha decaído extraordinariamente en el mundo desarrollado, el uso de leña como biomasa para generar energía sigue teniendo una gran importancia en amplias áreas de África y Asia. En cualquier caso el impacto mayor viene causado por la deforestación que se genera cuando su explotación se hace de forma descontrolada.



El gas natural se presenta, de forma creciente, como una alternativa más limpia, que permite reducir el impacto medioambiental del resto de los combustibles fósiles. En él resulta más fácil la reducción en su producción de la cantidad de azufre y partículas, al tiempo que en la combustión genera  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$  en cantidades mucho menores por unidad de energía útil producida. Pero no se puede hablar del gas natural como si de una panacea se tratase ya que aunque menos que el carbón y el petróleo, sigue contaminando la atmosfera más que muchas otras formas de generación.

El ritmo de depuración natural de la atmosfera es mucho menor que el de producción de los contaminantes. Este desfase entre generación y eliminación es lo que provoca que los contaminantes aumenten a escala global. Un ejemplo de esto es el  $\text{CO}_2$ , cuya concentración ha aumentado considerablemente en los últimos 200 años debido a la actividad industrial, esta concentración ha aumentado alrededor de un 20% en comparación con los niveles de hace 200 años con sus respectivas consecuencias.

## **6.2. Contaminantes secundarios: lluvia ácida y smog foto-químico**

Además de los contaminantes que podemos denominar primarios ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , partículas, etcétera), se producen reacciones químicas en la atmósfera que generan nuevos agentes, contaminantes secundarios, que inciden muy negativamente en el medio ambiente originando problemas como la lluvia ácida y el smog foto-químico.

Lluvia ácida es el término que se emplea para denominar a cualquier forma de precipitación (agua, nieve, granizo o niebla) que tiene una acidez superior a un nivel determinado.

Su origen está en la emisión a la atmósfera dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

Las fuentes de estos contaminantes primarios, precursores de la lluvia ácida son de carácter natural (volcanes, incendios forestales y la actividad bacteriana) y antropogénico, producidos por la actividad industrial y muy especialmente por las centrales térmicas donde se queman combustibles fósiles para producir energía. Otra fuente de naturaleza antropogénica muy importante son las emisiones producidas por el transporte por carretera, basado en vehículos propulsados por motores de combustión.



La contaminación de origen humano es con mucho la principal responsable de la lluvia ácida por su mayor volumen y por la elevada concentración de los contaminantes en las áreas industriales y urbanas. Además los niveles de emisión han tendido a crecer con la industrialización.

Los efectos de la lluvia ácida se hacen sentir sobre las aguas continentales, produciendo un descenso del PH, sobre las masas forestales, las cosechas y suelos agrícolas y las construcciones humanas, sobretodo de caliza.

Conscientes del problema, los países industrializados se hallan empeñados en disminuir las emisiones causantes de la lluvia ácida. La mayor parte de la responsabilidad de las emisiones de dióxido de azufre,  $SO_2$ , reside como ya dijimos, en las centrales térmicas que queman carbón y es en este campo donde se están tomando las iniciativas más importantes, como son la sustitución del carbón por combustibles fósiles con menores concentraciones de azufre o el empleo de sistemas de combustión que neutralizan las emisiones como por ejemplo el de lecho fluido.

Estas medidas citadas pueden ser pequeños remedios que no logran resolver el problema en plenitud, simplemente aminoran sus consecuencias negativas, algo que no es suficiente. La solución más sensata para eliminar estas emisiones sulfurosas que provocan estos problemas es sustituir las centrales térmicas de combustibles fósiles por centrales nucleares o renovables que no emiten este tipo de gases y solucionan el problema completamente.

Por ultimo también hay que mencionar un fenómeno típico de grandes urbes, que tiene su principal origen en las emisiones de contaminantes del transporte urbano. El smog foto-químico, que hace que las grandes ciudades que gozan de un clima soleado y una elevada densidad de tráfico, como por ejemplo Madrid, se vean especialmente afectadas.

Provoca irritaciones en las mucosas, en los ojos y en el sistema respiratorio y daña seriamente a la vegetación.

Entre las soluciones que se barajan, todas tratan de incidir sobre las emisiones originadas por el parque automovilístico, principal responsable del problema.



### 6.3. El calentamiento global, sus causas y efectos:

El clima de nuestro planeta es un sistema complejo, fruto de la interacción de la atmósfera, la hidrosfera (mares y océanos), la criosfera (casquetes polares), la biosfera y la litosfera, incluyendo los suelos. Por otro lado se sabe que el clima no ha sido algo estático a través del tiempo. Gracias a las evidencias geológicas se conoce la existencia de periodos glaciares que se han ido alternando con otros más cálidos. Entre las causas que se han aducido para justificar esta alternancia se pueden citar cambios cíclicos en las radiaciones solares, variaciones en la trayectoria e inclinación del eje de rotación terrestre (ciclos de Milankovitch), etc.

Es importante tratar de predecir o estudiar como el clima va variando ya que de él depende gran medida de los recursos hídricos mundiales, que a su vez es el medio que permite la vida en la Tierra.

A un nivel planetario, se estima que un tercio de la radiación solar que incide sobre la Tierra es reflejada al espacio, el resto penetra y es absorbida por el aire, el agua, la tierra y las plantas, convertida en energía térmica y emitida en forma de radiaciones infrarrojas que se devuelven a la atmósfera. Los gases como el dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , el metano,  $\text{CH}_4$ , el óxido nitroso,  $\text{N}_2\text{O}$ , el vapor de agua y los CFC juegan un papel esencial en este proceso ya que permiten el paso de las radiaciones solares, pero no permiten el paso radiaciones infrarrojas, haciendo así que una gran parte de la radiación incidente del sol no pueda volver a escapar de la Tierra provocando un calentamiento de la atmósfera terrestre. Esta consecuencia se denomina efecto invernadero.

Este efecto, totalmente natural, lejos de ser perjudicial, es el que permite la existencia de la vida en la Tierra al elevar la temperatura, que de otra forma sería del orden de  $33^\circ\text{C}$ , más baja. De esta forma los gases de efecto invernadero, que como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  o el  $\text{N}_2\text{O}$ , o el  $\text{H}_2\text{O}$  se encuentran de forma natural en la atmósfera se convierten en los reguladores del clima, influyendo en mayor o menor medida según en qué concentraciones estén.

El  $\text{CO}_2$  es el gas con mayor importancia en la contribución antropogénica, no natural, al calentamiento global. Se estima que es responsable de un 60% del total del efecto invernadero. Le sigue en importancia el metano,  $\text{CH}_4$ , que supone sobre un 20% y del



que se estima que la mitad de sus emisiones son responsabilidad humana (ganado vacuno, arrozales y emisiones de gas natural). Al óxido nitroso,  $N_2O$ , se le atribuye una responsabilidad del 6% y su origen se atribuye a los abonos nitrogenados. Finalmente los clorofluorocarbonados (CFCs), sustancias totalmente artificiales, son responsables de un 14% del total.

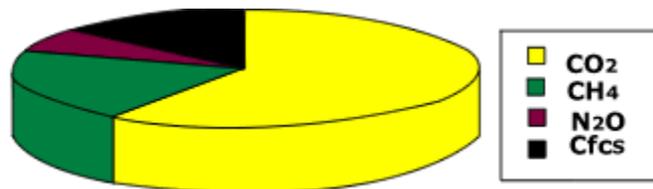


Figura 11: Responsabilidad de los distintos gases en el efecto invernadero.

Estos incrementos en los gases de efecto invernadero son ya una realidad innegable y son los responsables de la elevación de la temperatura media del planeta experimentada en las últimas décadas. Según el informe de 2001 del IPCC, la temperatura ha aumentado 0,6 °C en los últimos cien años, pero las predicciones del IPCC para el año 2100 son bastante poco alentadoras ya que estiman que la temperatura global ascenderá entre 1,4 °C y 5,8 °C. Un hecho objetivo que fundamenta el aumento de la temperatura del planeta es que los cinco años más calurosos que se han registrado desde 1860, fecha en que comenzaron a realizarse medidas fiables, han tenido lugar en los últimos 10 años.

Como consecuencia de este aumento global de las temperaturas se está empezando ya a constatar una reducción en la superficie de los glaciares de montaña y una disminución de los casquetes polares (En el Ártico un 10% en extensión y un 40% en grosor), lo que sin duda acelerará el proceso de calentamiento al reducir el efecto albedo producido por los casquetes polares. Como resultado el nivel del mar podría ascender entre 0,1 y 0,9 metros. Estas subidas del nivel del mar pueden ser catastróficas al suponer la inmersión de los espacios costeros donde se concentra un elevado porcentaje de la población mundial. También se cree que el calentamiento global no será homogéneo y que será mayor en los polos que en el ecuador, con lo que se modificará la forma en que fluye el calor entre estos y se alterarán los sistemas atmosféricos (borrascas, anticiclones, etc.) lo que podría traducirse en importantes variaciones en el régimen de precipitaciones de diversas áreas con la acentuación de sequías y lluvias torrenciales.



Por último hay que mencionar que los procesos que han comenzado en la atmósfera debido a la actividad antropogénica son muy difíciles de detener debido a la gran inercia del sistema climático mundial, por lo que las temperaturas seguirán aumentando y con ella el nivel del mar con sus consiguientes consecuencias. Aunque pueda ser imposible revertir la situación, sí que hay medidas que puedan tratar de aminorar este proceso, para ello se ponen en marcha acuerdos internacionales como el protocolo de Kyoto o se aconsejan medidas como el plan 20/20/20 para Europa.

Algunas de las medidas que se proponen para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> de origen antropogénico son las siguientes:

- Promover las energías renovables o las no basadas en combustibles fósiles.
- Mejorar la eficiencia energética.
- Luchar activamente contra la deforestación.
- Implementar mecanismos para capturar las emisiones de CO<sub>2</sub> que van a la atmósfera y confinarlas en el subsuelo.

Es interesante observar que el plan 20/20/20 que España no va a cumplir, consta de tres hitos esenciales que en definitiva tratan de frenar este efecto invernadero ya que los objetivos impuestos en este plan son la reducción de emisiones, la mejora de la eficiencia energética y el uso de fuentes renovables por encima de un porcentaje. Y puede sonar algo ambicioso pero solamente promoviendo y usando las energías renovables de manera correcta se podrían cumplir los otros dos puntos del plan.

#### 6.4. La contaminación radiactiva:

La energía nuclear, estigmatizada por accidentes del pasado, provoca un gran rechazo en la población, en este apartado se va a estudiar los principales impactos medioambientales que puede llegar a causar y de qué manera se podrían minimizar.

Se pueden cifrar los principales impactos medioambientales de la energía nuclear en los siguientes puntos:

- Peligro de accidente nuclear.
- Peligro de utilización bélica.
- Producción de residuos radiactivos.



- Contaminación térmica de las aguas.

El problema más acuciante y el más visible para la opinión pública, altamente sensibilizada sobre el particular, es el peligro de un accidente que pueda producir la liberación incontrolada de altas cantidades de radiactividad al medio ambiente. Han ocurrido varios accidentes a lo largo de la historia, quizá el más recordado sea el de Chernóbil, en 1986, en el territorio de la extinta URSS, hoy Ucrania. Su impacto sobre el medioambiente, la economía y la salud de los habitantes de una amplia área de Bielorrusia, Rusia y Ucrania fue enorme. Como resultado del accidente se produjo la liberación de grandes cantidades de radiactividad a la atmósfera cuyos efectos se extendieron y se hicieron notar por casi toda Europa.

La confianza de amplios sectores de la sociedad en la energía nuclear se ha visto seriamente disminuida, lo que ha supuesto un parón en los planes previstos de desarrollo de la misma, sobre todo en los países de la OCDE. Y ello a pesar de que los graves problemas relacionados con el calentamiento global y la inestabilidad en los mercados de petróleo que se vienen registrando en los últimos tiempos han favorecido la aparición de voces favorables a la reactivación de los programas nucleares.

En España, donde el organismo competente en materia de seguridad nuclear es el consejo de seguridad Nuclear, se ha producido un importante debate en los últimos tiempos, en torno al cierre y la prolongación de la vida activa de algunas centrales (Zorita y Garoña).

Otro problema adicional es el originado por el hecho de que la tecnología nuclear puede tener un doble uso: civil y militar. La misma tecnología que puede permitir la creación de centrales nucleares para producir energía eléctrica con fines pacíficos puede modificarse para ser utilizada con fines bélicos y constituir una amenaza para la paz mundial.

Los residuos nucleares surgen como subproducto consecuencia de la actividad de las centrales nucleares. El problema de estos residuos es que son isótopos radiactivos con una larga vida y una alta peligrosidad. Es cierto que hay otras actividades como la industria o la medicina que también generan estos residuos, pero son las centrales nucleares las que los originan en mayor cantidad y de mayor duración.

Los residuos radiactivos se clasifican en tres categorías:

- Baja actividad.



- Media actividad.
- Alta actividad.

Los dos primeros, presentan menor problemática, por las moderadas dosis de radiación que emiten. En casos de muy baja actividad se opta por su dilución y dispersión en el medio ambiente, sólo en el caso de que ello no suponga elevar de forma inadmisiblemente la radiactividad natural. En el resto de casos su tratamiento consiste en depositarlos en contenedores especiales que se almacenan en superficie, para después confinarlos en depósitos subterráneos controlados, en terrenos geológicamente estables. En España existe una instalación de este tipo, El Cabril (Córdoba), gestionada por ENRESA, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, con capacidad para 50.000 m<sup>3</sup> para este tipo de residuos.

El problema más grave lo plantean los residuos de alta actividad, restos del combustible utilizado en las centrales y de armamento atómico. Su vida útil puede llegar a varios cientos de miles de años. Como consecuencia, tras un periodo de decaimiento, el combustible gastado debe ser almacenado aunque existe la alternativa de reprocesar el combustible usado y utilizarlo en plantas especiales, con el fin de utilizar el uranio y el plutonio presentes en los residuos y disminuir el volumen total de éstos. En cualquier caso, también el residuo final debe ser almacenado de forma segura por largo tiempo. La solución técnica que se maneja es su vitrificación y almacenamiento en contenedores especiales no corrosibles, que se emplazarían a gran profundidad, en depósitos refrigerados de alta seguridad en terrenos de una gran estabilidad geológica.

Por último, hay que hacer notar que la relativa corta vida de las centrales nucleares hace que se produzcan en su desmantelamiento grandes cantidades de residuos de alta, media y baja actividad que han de ser tratados por los procedimientos antes descritos.

## **7. Residuos y emisiones en España:**

Una vez analizados los distintos tipos de subproductos que se generan debido a la actividad energética se va a proceder a valorar datos reales sobre estos contaminantes a nivel mundial y en concreto de España.



Las emisiones globales de CO<sub>2</sub> han aumentado en el 2013 un 2,2% con respecto al 2012, sobrepasando los 32 mil millones de toneladas. Respecto al año 2000, las emisiones de CO<sub>2</sub> por uso de energía han subido globalmente un 38%, mientras que en los países desarrollados éstas han disminuido (12,7% en la UE-15 y 3,3% en la OCDE). Estos datos advierten que desde el año 2000 en adelante los países más desarrollados han ido optando poco a poco por formas de generación menos contaminantes (renovables) mientras que los países en vías de desarrollo siguen generando mucha de su energía a través de la quema de combustibles fósiles o materia orgánica (biomasa) que es muy contaminante.

Analizando el caso concreto de España, en el año 2015 las emisiones de CO<sub>2</sub> permanecieron en torno a los 280 millones de toneladas, un 5% más que el año anterior, situando los niveles de emisión en los que había en 1998. Bien es cierto que este dato engloba las emisiones también debidas al transporte. Si se centra el análisis en el estudio de las emisiones debido a la generación de energía las cifras son obviamente menores, pero las conclusiones no son nada alentadoras. Debido al último despunte sufrido por las energías renovables en los últimos dos años donde se ha aumentado considerablemente la energía generada a través de la quema de combustibles fósiles y nucleares, ha tenido lugar un aumento de las emisiones contaminantes en España.

Según datos del avance anual de Red Eléctrica, en el 2015 España aumentó sus emisiones de dióxido de carbono asociadas a la generación de energía eléctrica con respecto al 2014 en un 20%, es decir se emitieron 13 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> más que en el año anterior, haciendo un total de casi 75 millones de toneladas.

## EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> ASOCIADAS A LA GENERACIÓN ELÉCTRICA PENINSULAR

[ Mill. tCO<sub>2</sub> ]

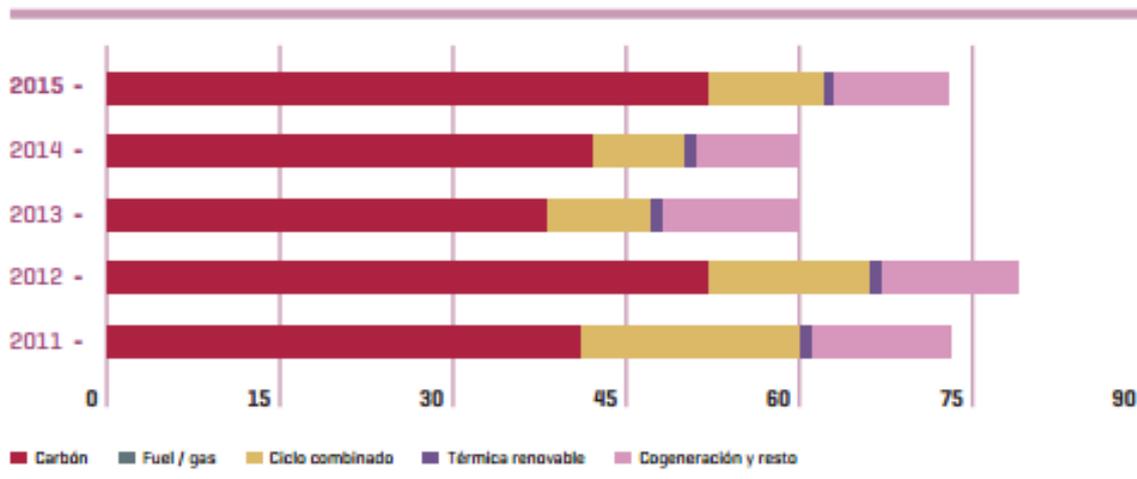


Figura 12. Evolución de las emisiones asociadas a la generación eléctrica

Estos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> tienen su principal origen en la quema de carbón, que como se ha visto anteriormente no sólo emite dióxido de carbono sino que también genera otros muchos contaminantes aún más nocivos como el SO<sub>2</sub> o el CO.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la generación eléctrica suponen alrededor del 30% de las emisiones totales de España generándose el resto en otros sectores como el transporte, el sector terciario o la industria. Este porcentaje puede parecer pequeño a la hora de intentar reducir las emisiones de un país cambiando sus formas de generar energía pero toda contribución, por pequeña que sea, ayuda enormemente a reducir las emisiones y a contribuir a un mundo más sostenible.

A continuación se incluye una tabla con los costes externos asociados a las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas. Debido a la dificultad para cuantificar y estudiar los costes externos solo se han incluido aquellos más significativos. Los datos que se muestran son del 2014 y hacen referencia a todo el sector energético español, y para obtener los datos se ha utilizado un estudio reciente del FMI sobre los valores de los costes externos.



	<b>Emisiones (Miles de toneladas)</b>	<b>Precio externalidad (Euros por toneladas)</b>	<b>Coste total estimado (Millones de euros)</b>	<b>Contribución relativa</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	243.659	30	7.309	32%
<b>NO<sub>x</sub></b>	762	14.000	10.668	46%
<b>SO<sub>2</sub></b>	215	18.000	3.870	17%
<b>PM<sub>10</sub></b>	60	22.000	1.320	6%

Tabla 13. Externalidades asociadas a cada forma de emisión.

Con los datos mostrados en la tabla se puede ver que el coste estimado de las emisiones de contaminantes más predominantes en España es de 23.167 millones de euros. Este número en euros trata de dar un valor medible a los efectos indirectos, y en este caso negativos, que tiene la producción y consumo de energía en España.

En cuanto a los residuos nucleares en España, actualmente se gestionan de diversas formas:

Los residuos de baja actividad, básicamente formados por ropas o herramientas que se han utilizado en el mantenimiento de la central nuclear, se prensan y mezclan con hormigón para después meterlos en bidones de acero. Los de media actividad se generan por radionucleídos liberados en el proceso de fisión en cantidades pequeñas, que también son depositados en bidones de acero. Todos estos bidones son trasladados al Centro de Almacenamiento de El Cabril, en la provincia de Córdoba, gestionado por ENRESA. Allí se depositan los residuos radiactivos de todas las centrales nucleares españolas, así como los residuos generados por la medicina, la investigación, la industria y otros diversos campos que utilizan materiales radiactivos en sus procesos. Se estima que el volumen de los residuos de baja y media actividad que se gestionarán en España en los próximos 40 años será de unos 200.000m<sup>3</sup>.

Los residuos de alta actividad, en España formados por el combustible usado de las centrales nucleares. En la gestión de estos residuos es donde España tiene más problemas ya que actualmente no existe ningún sitio adecuado para almacenarlos, aunque el proyecto sí que existe. Actualmente se almacenan temporalmente en unas



piscinas de agua situadas dentro de las centrales nucleares y construidas de hormigón con paredes de acero inoxidable, creando así una barrera a las radiaciones sin peligro de escape. Aquí los residuos radiactivos de alta actividad están almacenados de forma segura y controlada pero la capacidad de las piscinas no es demasiado grande y es una solución temporal ya que en la actualidad ENRESA está trabajando en el proyecto del Almacén Temporal Centralizado (ATC) para almacenar los residuos de alta actividad.

El ATC es una instalación diseñada para guardar en un único lugar el combustible gastado de las centrales nucleares y los residuos de alta actividad que se producen en España (total material a almacenar: 12.816 m<sup>3</sup>).

Cabe mencionar que tras un incendio en la central de Vandellós I en 1989 se procedió a su desmantelamiento, con la consiguiente producción de una alta cantidad de residuos nucleares de alta actividad, como España no disponía ni aún dispone de un lugar para poder almacenarlos se llevaron a Francia. España tiene que pagar alrededor de 40.000€ al día por la gestión, por lo que desde 1989 España ha pagado más de 200 millones de euros a Francia.

Según el VI Plan General de Residuos Radiactivos el coste de la gestión de los residuos radiactivos en España, desde 1985 hasta el 2070, es de unos 15.000 millones de euros, de los cuales en 2006 ya se había incurrido en un 25% de los costes totales aproximadamente.

Como se ha visto en esta sección España y sobretodo sus habitantes tienen que lidiar con numerosos problemas y costes derivados del uso de centrales térmicas y nucleares. Es difícil estimar de qué manera le afecta a cada español los costes de la gestión de los residuos nucleares pero lo que es innegable es que encarece de alguna forma el precio de la energía. Por otro lado las emisiones de contaminantes nocivos aparte de contribuir al calentamiento global pueden provocar problemas de salud como ya se vio cuando se analizó con detenimiento cada tipo de contaminante.

Con el modelo de simulación que se usará posteriormente se tratará de obtener un mix energético nacional que permita reducir las emisiones a la vez que se aumenten los niveles de eficiencia energética y tasa de renovables.



## 8. Modelo de simulación:

A continuación se van a realizar distintas simulaciones y análisis de sensibilidad a través de un modelo estático de equilibrio parcial. El modelo se llama MASTER.SO y ha sido diseñado para el análisis de políticas energéticas sostenibles. Es un modelo de programación lineal que tiene multitud de parámetros de entrada y trata de satisfacer una demanda energética de un país cualquiera mientras maximiza la sostenibilidad del sistema. Sostenibilidad comprendida como el coste total de la energía suministrada (costes de inversión, costes de operación, costes de importación, subsidios, etc.) y también de sus externalidades. Mientras el modelo maximiza la sostenibilidad, respeta las principales restricciones técnicas de los sistemas energéticos, tales como los balances de energía, los límites de capacidad y las condiciones técnicas de fiabilidad entre otras.

El funcionamiento del modelo es el siguiente: Al modelo se le da un año y la posible demanda energética para España en ese año, en este caso se ha escogido el año 2030 ya que analizar posibles formas de distribuciones energéticas sostenibles para el año 2020 da bastante poco margen de tiempo para poder llevar a cabo cambios en la distribución de generación energética. La demanda que se tratará de satisfacer es una demanda realizada a través de un estudio de la proyección de la demanda actual española. Si en el año 2015 la demanda ha sido de 248.181 GWh, un 1.9% superior al año anterior y se espera que la demanda española siga en aumento ya que se comienza a salir de la época de recesión económica que ha habido los últimos años, se estima que la demanda energética para el 2030 sea ligeramente superior a la demanda actual, tal vez entre los 260.000 y los 300.000 GWh.



## EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA

Año	GWh	Δ Anual (%)	Δ Anual corregido (%) [1]
2011	255.597	-1,9	-1,0
2012	252.014	-1,4	-1,8
2013	246.368	-2,2	-2,2
2014	243.544	-1,1	-0,1
2015	248.181	1,9	1,5

[1] Por los efectos de laboralidad y temperatura.

Figura 14: Evolución de la demanda española

El modelo tiene infinidad de parámetros ya establecidos que definen con exactitud todas las características del sistema energético español por lo tanto, lo que habrá que hacer para poder comenzar a trabajar con el modelo es darle como entrada dos tipos de datos distintos; un primer grupo de datos que definen la potencia instalada ahora mismo de cada forma de generación, y una segunda sección de datos que precisa la máxima potencia que podría llegar a haber instalada de una determinada forma de generación. El modelo escogerá el mix energético más sostenible para alimentar energéticamente a España durante un año completo con la potencia instalada, gracias a esto se podrá comprobar si otro mix más sostenible, que en definitiva sería un mix más económico y menos contaminante es posible en España en base a la energía hidráulica y al potencial hídrico aún explotable. Cabe mencionar que el modelo es tremendamente completo y de él se obtendrán muchísimos datos de salida aparte de la distribución del mix, como por ejemplo, la dependencia energética del exterior, los costes de la energía y las emisiones totales, resultados que será también interesante analizar cómo varían.

En definitiva al modelo se le dará de entrada la potencia instalada en España ahora mismo de cada forma de generación y se variará, analizando detenidamente cada caso, la potencia instalada de mini hidráulica, de centrales fluyentes, etc. Intentando encontrar una distribución energética más sostenible.

Otro de los parámetros de entrada al modelo es el límite de las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2030, se ha elegido 230 millones de toneladas. En el año 2015 las emisiones fueron algo superior a 240 millones de toneladas por lo que aunque pueda parecer algo



ambicioso elegir un valor de emisiones inferior al actual, es un valor mayor de lo que la UE y demás organizaciones impondrán a España como objetivo a cumplir para ese año.

De las simulaciones se estudiarán en mayor profundidad los siguientes parámetros o resultados, que se han considerado indicadores objetivos de sostenibilidad.

- La distribución del mix energético: mostrará el porcentaje de energía eléctrica producida por cada forma de generación. El peso que puedan tener las distintas formas de generación determinará el valor que tomen los siguientes parámetros.
- Dependencia energética del exterior: indica que porcentaje de la energía consumida y generada en España es de origen autóctono, básicamente y debido a la escasez de materias primas para la generación energética en España, este indicador mostrará que porcentaje de la energía consumida en España es de origen renovable. Se debe explicar que el porcentaje de dependencia energética obtenido a través del modelo se refiere a todo el sistema energético español, incluido transportes, generación eléctrica y sector terciario, por lo que las disminuciones de la dependencia energética que se esperan serán muy pequeñas. De todas formas se analizará una dependencia energética relativa que sólo tendrá en cuenta la dependencia asociada a la generación eléctrica.
- Cantidad de emisiones: se estudiará como los distintos mixes energéticos hacen que aumente o disminuya los millones de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos debido a la generación de energía eléctrica.
- Precio sombra de la electricidad: hace referencia al precio que tendría ese bien en condiciones de competencia perfecta, incluyendo los costos sociales además de los privados. Puede ser que alguna distribución energética pueda disminuir este valor haciendo que, si la regulación lo permitiese, se pudiese disminuir el precio de la factura de la luz aliviando de esta forma a muchas familias necesitadas.

En las simulaciones que se van a realizar a continuación se van a comprobar distintas hipótesis. Se estudiará como el aprovechamiento hídrico del potencial aún explotable por las distintas formas de generación hidráulica cambia las distribuciones energéticas de



España, tratando de buscar una distribución energética donde un mayor aprovechamiento del agua pueda permitir un sistema más sostenible.

### 8.1. Primera simulación:

La primera simulación tendrá como datos de entrada la potencia instalada de cada forma de generación que hay en España a fecha del 31 de diciembre del 2015. Los datos son los obtenidos en el Avance de 2015 de Red Eléctrica. Esta primera simulación tratará de satisfacer una demanda anual española para el año 2030 con la potencia actualmente instalada, se supone que los datos obtenidos del modelo van a dar la distribución más sostenible posible, por lo que si los datos obtenidos distan mucho de la distribución actual de la energía en España quiere decir que el mix energético actual de España es claramente mejorable en términos económicos y ambientales.

Datos de entrada: son las potencias actualmente instaladas de las distintas formas de generación.

<b>Forma de generación</b>	<b>Potencia instalada (GW)</b>
Nuclear	7,866
Carbón	11,482
Fuel/gas	2,784
Ciclo combinado	27,199
Eólica	23,003
Solar térmica	2,300
Solar fotovoltaica	4,667
Cogeneración	7,219
Hidráulica fluyente	6,640
Hidráulica de reserva	9,690
Mini hidráulica	1,920
Bombeo	3,371
<b>Total</b>	<b>107,963</b>



En esta primera simulación los datos de la máxima potencia que se puede instalar permanecerán igual que los datos de la potencia instalada, es decir que se limitará para que no se instale más capacidad de la que hay ahora mismo en un año.

Los datos obtenidos son los siguientes:

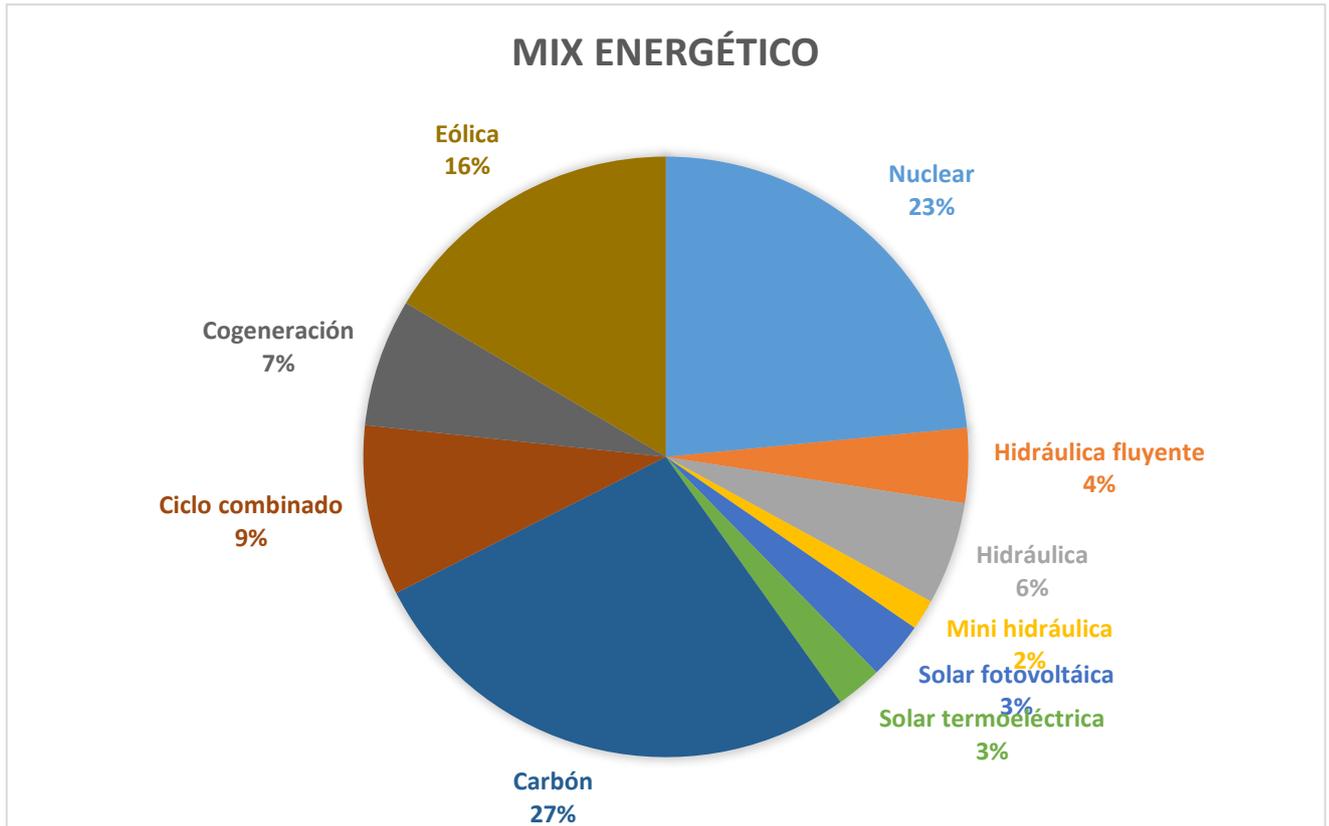


Figura 15. Mix energético con la potencia actualmente instalada en España

Debido al considerable aumento de la demanda respecto al año 2015, pero sin embargo, al no haber cambiado la potencia instalada se puede apreciar que ha sido necesario más producción de energía a través de carbón y nuclear para conseguir satisfacer la demanda.

El mix energético obtenido es muy parecido al que hay actualmente en España; la cobertura de la demanda por energía hidráulica se sitúa en el 12% (sin incluir generación por bombeo) cuando actualmente está en el 11.1%, la solar tiene un crecimiento también prácticamente inapreciable ya que en el 2015 se situó en el 5,2% y en esta simulación alcanza el 5,5%. La energía eólica, la generación a través de cogeneración y



de ciclo combinado baja ligeramente en contraste con la energía nuclear y el carbón, que pasan de tener un peso del 21,7% y del 20,3% respectivamente en el 2015 a significar el 23% y el 27% del mix. Puede parecer muy llamativo el hecho de que gane peso el carbón a la hora de ajustarse a una demanda mayor pero esto también tiene sus consecuencias muy negativas ya que este uso predominante de energías no renovables ha provocado un aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> pasando de 74 Millones de toneladas en el 2015 a 83.8 Millones de toneladas.

Otra consecuencia derivada de este aumento del uso de carbón y de energía nuclear es que la dependencia energética del exterior ha aumentado considerablemente hasta la alarmante cifra del 88.2%, se recuerda que en el año 2015 la dependencia energética rondó el 86%.

Los resultados obtenidos son realmente interesantes, ya que lo que indican es que España no está preparada para poder afrontar una demanda algo más grande que la que hay ahora de una manera sostenible, quizá porque la capacidad instalada actualmente no da mucho margen para cambiar el mix actual. Cabe mencionar que este mix obtenido difiere ligeramente al del 2015 porque la demanda que ha tratado de satisfacer el modelo es hasta un 15% mayor que la que hay actualmente, tal vez los resultados podrían variar si la demanda fuese menor pero se ha considerado interesante tratar de obtener unos datos validos de cara al futuro de España intentando anticiparse a las necesidades energéticas que puedan haber.

Es algo apremiante indicar que si nada cambia en los próximos años la dependencia energética del exterior y las emisiones debidas a la generación de electricidad seguirán aumentando, lo que niega a España cualquier posibilidad de poder cumplir futuros planes medioambientales o de eficiencia energética.

El precio sombra de la electricidad alcanza un valor de 128,2 €/MWh, un valor que se analizará cómo cambia en función de la distribución energética para así poder extraer conclusiones válidas de si se podría llegar a disminuir la factura de la luz con un mix distinto.

La energía hidráulica (sin incluir la generación por bombeo) producida en esta simulación es de 32862.8 GWh mientras que la energía que se produjo en el 2015 gracias a recursos hídricos fue muy similar, 31392 GWh. Por lo que los resultados de la producción hidráulica actual tienen mucho sentido, sin embargo, según el Plan de Energías



Renovables del IDAE el potencial hídrico técnicamente explotable es más del doble, hipótesis que se analizará detenidamente en las siguientes simulaciones de manera individual por cada tipo de central y finalmente de manera conjunta.

## 8.2. Segunda simulación: centrales mini hidráulicas.

En esta simulación el estudio se centrará en la energía mini hidráulica: se tratará de encontrar cuanta es la potencia que debe haber instalada para poder obtener la máxima energía posible para este tipo de centrales de pequeña potencia. Según el IDAE esta cifra debería llegar a los 6.700 GWh para el año 2020, pero a la vez se presentan dos escenarios de desarrollo hidráulico, uno óptimo donde se llegarían a obtener estos 6.700 GWh/anuales con una potencia instalada de 2.66 GW y otro escenario que es el que desgraciadamente está teniendo lugar y por el que la cifra a la que se espera llegar a poder obtener en centrales mini hidráulicas es algo menor, con unos 2.2 GW de potencia instalada.

Hay que tener en cuenta que estas cifras que maneja el IDAE en su Plan de Energías Renovables son para el año 2020, y que las simulaciones que se están llevando a cabo son para el 2030 por lo que habrá que analizar un tercer escenario donde la energía capaz de obtener con centrales mini hidráulicas sea algo mayor al escenario óptimo para el año 2020.

En estas simulaciones que se van a llevar a cabo lo que se va a variar va a ser la potencia mini hidráulica instalada en cada hipótesis, mientras que la potencia instalada de las distintas formas de generación permaneces constantes, como se muestra en la siguiente tabla. Las variaciones van a ser muy pequeñas en comparación con toda la energía nacional por lo que se espera que las cifras de dependencia energética, de emisiones contaminantes y del precio sombra de la energía no se vean prácticamente alteradas.



Forma de generación	Potencia instalada (GW)	Primera Hipótesis (GW)	Segunda Hipótesis (GW)	Tercera Hipótesis (GW)
Nuclear	7,866	7,866	7,866	7,866
Carbón	11,482	11,482	11,482	11,482
Fuel/gas	2,784	2,784	2,784	2,784
Ciclo combinado	27,199	27,199	27,199	27,199
Eólica	23,003	23,003	23,003	23,003
Solar térmica	2,300	2,300	2,300	2,300
Solar fotovoltaica	4,667	4,667	4,667	4,667
Cogeneración	7,219	7,219	7,219	7,219
Hidráulica fluyente	6,640	6,640	6,640	6,640
Hidráulica de reserva	9,690	9,690	9,690	9,690
<b>Mini hidráulica</b>	<b>1,920</b>	<b>2,200</b>	<b>2,660</b>	<b>3,500</b>
Bombeo	3,371	3,371	3,371	3,371
<b>Total</b>	<b>107,963</b>	<b>108,243</b>	<b>108,703</b>	<b>109,543</b>

### 8.2.1. Escenario actual según el IDAE: primera hipótesis

Potencia mini hidráulica instalada para el año 2020: 2,20 GW.

En este caso la producción energética mini hidráulica asciende hasta 5.500 GWh anuales, un valor ligeramente superior al obtenido en la primera simulación, que era de 4.828 GWh. Como se puede ver el cambio en el sistema energético global es muy pequeño todavía por lo que la distribución del mix no va a sufrir alteraciones.

En cuanto a la demanda energética, esta no cambia prácticamente nada continuando con los valores de la primera simulación, mientras que la dependencia energética, las emisiones y el precio sombra de la energía decrecen como era de esperar pero de manera casi imperceptible como era también predecible.

### 8.2.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda hipótesis

Potencia mini hidráulica instalada para el año 2020: 2,66 GW.

Para una potencia mini hidráulica instalada de 2,66 GW la producción anual energética es de 6.690 GW/h. En este caso la demanda energética es casi idéntica a la de los dos anteriores casos, y aunque los cambios en el mix, en la dependencia energética y en las emisiones vayan a ser también pequeños, en este caso se analizarán con más detenimiento.

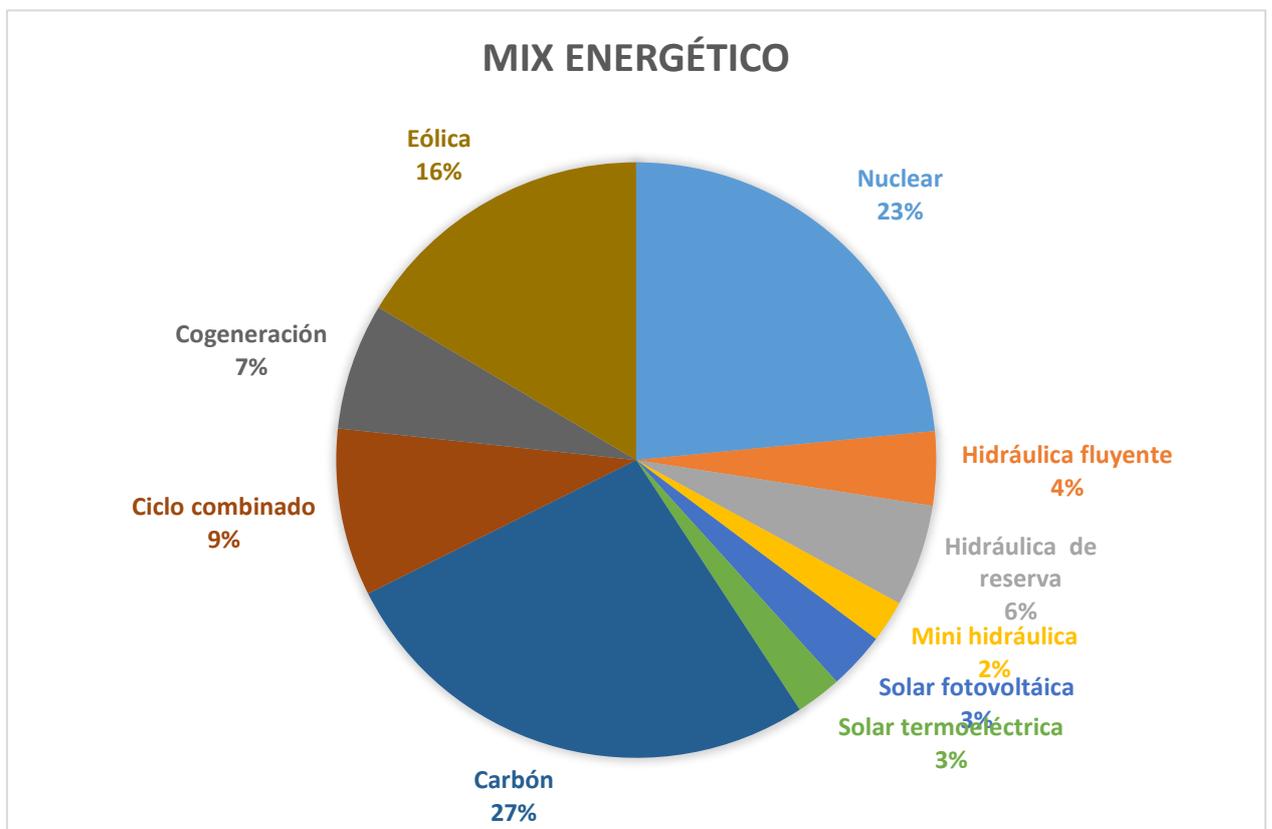


Figura 18. Mix energético con 2,66 GW de potencia mini hidráulica instalada

Se puede observar que aunque la producción energética anual mini hidráulica haya pasado de los 4.828 GWh hasta los casi 6.700 GWh el mix no cambia en porcentajes ya que este valor sigue siendo muy pequeño en comparación con la producción de otras formas de generación.



Sorprendentemente aunque la cifra de producción mini hidráulica sea pequeña ya comienzan a verse cambios interesantes, como por ejemplo reducción del uso de carbón, en la primera simulación se situaba en 80.206 GWh y ahora está en 78.677 GWh. Esta reducción pese a ser leve tiene un efecto sobre la contaminación atmosférica y la dependencia energética, ya que las emisiones pasan de 83.8 millones de toneladas a 82.3 millones de toneladas, lo que hace un ahorro de 1.5 millones de toneladas anuales, y como era de esperar al disminuir el uso de carbón la dependencia energética baja de un 88.2% hasta un 88.01%.

Es cierto que estas variaciones son muy pequeñas, y que el mix apenas ha cambiado pero los datos que se están obteniendo son coherentes y prometedores.

### **8.2.3. Escenario probable para el 2030 con impulso del sector: tercera hipótesis**

Potencia mini hidráulica instalada para el año 2030: 3,5 GW.

En este caso se simulará el modelo con una potencia mini hidráulica instalada de 3,5 GW, fundamentando este hipotético valor en el hecho de que la simulación se realiza en el año 2030 y que el plan del IDAE indica en su escenario óptimo del 2020 que la potencia mini hidráulica será de 2,65 GW por lo que 10 años más tarde y con posibles avances tecnológicos la potencia instalada quizá sea mayor.

Los datos obtenidos siguen la tendencia esperada, la producción mini hidráulica aumenta y alcanza los 8.802,5 GWh. Su peso en el mix energético nacional aumenta, y se sitúa en el 3% con el consiguiente decrecimiento del consumo de carbón, que aunque escaso, esta disminución tiene consecuencias favorables en la dependencia energética y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La dependencia energética baja del 88% por primera vez durante todas las simulaciones, para establecerse en el 87.96% lo que sigue siendo un valor muy alto. En cuanto a las emisiones la cifra sufre ligeramente debido a que aunque disminuye el uso de carbón sube ligeramente la producción del ciclo combinado con sus consiguientes emisiones de dióxido de carbono.



El precio sombra de la energía se sitúa en 128.14 €/MWh, un cambio apenas perceptible por el consumidor, como era de esperar.

A continuación se muestra una tabla resumen de los valores obtenidos en la última simulación:

Forma de generación	Potencia instalada (MW)	Producción energética (GWh)	Peso en el mix (%)
Nuclear	7866	68906,1	23,44
Hidráulica fluyente	6463	11800	4,01
Hidráulica reserva	9690	16234	5,52
Mini hidráulica	3500	8802,5	2,27
Solar fotovoltaica	4667	9100,6	3,09
Solar térmica	2300	7249,6	2,46
Carbón	11482	78677,6	26,77
Ciclo combinado	27199	26747,9	9,10
Fuel oil	2784	0	0
Bombeo	3370	0	0
Cogeneración	7219	20192,2	6,87
Eólica	23000	48300	16,44
<b>Total</b>	<b>108700</b>	<b>293898,1</b>	<b>100</b>

Parámetros más representativos:

<b>Emisiones asociadas a la producción (MtCO<sub>2</sub>)</b>	<b>83.19</b>
<b>Precio sombra de electricidad (€/MWh)</b>	<b>128.14</b>
<b>Dependencia energética (%)</b>	<b>87.96</b>
<b>Dependencia energética relativa (%)</b>	<b>66.18</b>

### 8.3 Tercera simulación: centrales de tipo fluyente.

En esta simulación se analizará con detenimiento la energía que puede obtenerse a través de centrales hidráulicas de tipo fluyente, es decir se irá variando la potencia instalada de este tipo de centrales en función del potencial hídrico aun extraíble. Se ha elegido esta manera de hacer las simulaciones donde se analiza cada forma de generación hidráulica de forma independiente para poder extraer conclusiones de forma



más sencilla. Una vez se hayan analizado todas las formas independientemente se procederá a realizar las simulaciones conjuntas.

Bien es cierto que a la hora de estudiar el potencial hídrico aun explotable, el IDAE no hace distinción entre centrales con capacidad de reserva y centrales de río fluyente pero en el modelo sí que hay esa distinción ya que es muy distinto a la hora de la simulación tener grandes centrales con capacidad de reserva y mucha potencia instalada o centrales más pequeñas y que sufren mucho la escasez de lluvia como las de tipo fluyente.

Las centrales de río fluyente instaladas en España son muchas más que las centrales con capacidad de reserva o de pie de presa, sin embargo estas segundas tienen una potencia instalada mucho mayor por ejemplo la central de Aldeadávila tiene 1.243 MW y la de José María de Oriol en Alcántara tiene 957 MW de potencia instalada.

Es por ello que la potencia instalada de río fluyente ahora mismo en España ronda los 6.5 GW mientras que la potencia instalada de las centrales con capacidad de reserva es de 9.69 GW.

En estas simulaciones se van a analizar distintos escenarios, un primer escenario de la potencia que debería estar instalada para el 2020 si las cosas siguen el curso actual, un segundo escenario más optimista en cuanto a la potencia del 2020 y por último un escenario en el que toda o casi toda la potencia técnicamente desarrollable esté instalada en España para el 2030, pero que a su vez tenga en cuenta pequeñas restricciones en el agua disponible debidas al cambio climático.

Es importante recalcar que la energía extraíble del agua depende de la potencia instalada pero hay límites físicos ya que es imposible extraer más energía de los recursos hídricos españoles que un determinado valor. Esto se vio anteriormente en este proyecto pero se recuerda la siguiente información y es que según el IDAE y su análisis del potencial hídrico la energía técnicamente aprovechable con centrales hidráulicas en España es de 65.600 GWh anuales, este valor no tiene en cuenta las centrales de bombeo, y si se descuenta el potencial aprovechable por centrales mini hidráulicas (6700 GWh) se obtiene un valor de 58.900 GWh, un valor que prácticamente dobla al aprovechamiento actual.

Se recuerda que la simulaciones que ahora se van a llevar acabo tienen como datos de la potencia instalada los valores actualmente instalados, es decir los valores usados para la primera simulación, y la única forma de generación que se va a ir cambiando va a ser la hidráulica de tipo fluyente.

<b>Forma de generación</b>	<b>Potencia instalada (GW)</b>	<b>Primera Hipótesis (GW)</b>	<b>Segunda Hipótesis (GW)</b>	<b>Tercera Hipótesis (GW)</b>
Nuclear	7,866	7,866	7,866	7,866
Carbón	11,482	11,482	11,482	11,482
Fuel/gas	2,784	2,784	2,784	2,784
Ciclo combinado	27,199	27,199	27,199	27,199
Eólica	23,003	23,003	23,003	23,003
Solar térmica	2,300	2,300	2,300	2,300
Solar fotovoltaica	4,667	4,667	4,667	4,667
Cogeneración	7,219	7,219	7,219	7,219
<b>Hidráulica fluyente</b>	<b>6,640</b>	<b>6,760</b>	<b>7</b>	<b>11</b>
Hidráulica de reserva	9,690	9,690	9,690	9,690
Mini hidráulica	1,920	1,920	1,920	1,920
Bombeo	3,371	3,371	3,371	3,371
<b>Total</b>	<b>107,963</b>	<b>108,083</b>	<b>108,323</b>	<b>112,323</b>

### 8.3.1. Escenario actual según el IDAE: primera Hipótesis

Potencia instalada para el 2020: 6,76 GW.

En este primer escenario el aumento de potencia instalada es muy pequeño, apenas de 300 MW, por lo que se esperan cambios irrisorios en la dependencia energética, en las emisiones de CO<sub>2</sub>, en el mix energético y el precio sombra de la electricidad, pero será interesante analizar como la producción de las centrales de tipo fluyente aumenta.



La producción hidráulica de tipo fluyente ha aumentado desde los 11800 GWh anuales hasta los 12347 GWh, este aumento es muy pequeño y como era de esperar la disminución de la dependencia energética nacional prácticamente es inapreciable, al igual que el de las emisiones. Pero es interesante saber que un pequeño aumento de la potencia instalada tiene un aumento en la producción de este tipo de energía, lo que indica que según el modelo es una forma de generación sostenible.

### **8.3.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda Hipótesis**

Potencia instalada para el 2020: 7 GW

Este incremento sigue siendo muy pequeño por lo que es de esperar que los resultados obtenidos no varíen en comparación con la simulación anterior aunque tal vez ya se empiecen a ver valores de dependencia energética y de emisiones algo menores.

Los datos obtenidos continúan con la tendencia vista en el anterior escenario, la producción energética del tipo de centrales hidráulicas de tipo fluyente alcanza los 12728 GWh anuales. Este incremento es todavía demasiado pequeño para provocar cambios importantes en los indicadores energéticos de España, ya que por ejemplo, la dependencia energética se sitúa en el 88,14% y las emisiones en 83,14 millones de toneladas. Estos valores son ligeramente inferiores a los obtenidos en la primera simulación pero todavía distan mucho de llegar a valores "sostenibles".

### **8.3.3. Escenario futuro de pleno desarrollo hidráulico: tercera Hipótesis**

En este escenario se analizará cuanto es la máxima potencia que se puede extraer mediante este tipo de tecnología para el año 2030. Se tendrá en cuenta cual es el potencial hidráulico técnicamente aprovechable y como el cambio climático afecta sobre todo a este tipo de central hidráulica.

En primer lugar se parte de la premisa que del potencial hidráulico aprovechable en España (sin contar bombeo y mini hidráulica) alrededor del 40% se aprovecha mediante



centrales de río fluyente y el resto mediante centrales con capacidad de reserva. Se debe tener en cuenta que debido al cambio climático, al aumento medio de la temperatura en España y a la disminución de precipitaciones se reducirán los recursos hídricos en valores que van desde el 5% al 14%. Bien es cierto, que la disminución de estos recursos se dará en las cuencas hídricas menos explotadas hidráulicamente, como ya se explicó cuando se analizó el potencial hidráulico en este proyecto, por lo que la disminución de recursos aprovechables energéticamente no será tan elevada, tal vez estará entre el 4% y el 10%. Pero este tipo de centrales, las de río fluyente son las que más perjudicadas se pueden ver ante la disminución del agua.

Se sabe, como ya se ha dicho, que el potencial técnicamente aprovechable sin contar centrales mini hidráulicas y de bombeo está en torno a los 58900 GWh anuales, si las centrales de río fluyente podrían llegar a aprovechar un 40% de esta energía pero por otro lado, la disminución de recursos les afecta más que a las otras centrales, se puede llegar a estimar que la máxima energía capaz de aprovechar mediante este tipo de centrales en condiciones de sostenibilidad rondará los 23.000 GWh y los 20.000 GWh.

La potencia instalada de este tipo de centrales para poder aprovechar esta energía deberá estar entre los 13 GW y los 11 GW aproximadamente.

A continuación se procede a realizar las simulaciones con estos valores y a analizar si los resultados obtenidos son económica y medioambientalmente sostenibles.

Finalmente se ha realizado la simulación con una potencia instalada de 11GW, con esta potencia instalada la energía producida por las centrales de tipo fluyente es de 19.915 GWh anuales, un valor muy parecido al esperado antes de la simulación.

Se va a analizar el mix con detenimiento ya que se han obtenido datos muy llamativos. Por un lado la dependencia energética ha bajado hasta el 87.69%, el valor más bajo obtenido hasta ahora, sin embargo las emisiones contaminantes han subido hasta los 85,6 millones de toneladas.

El mix energético obtenido es el siguiente:

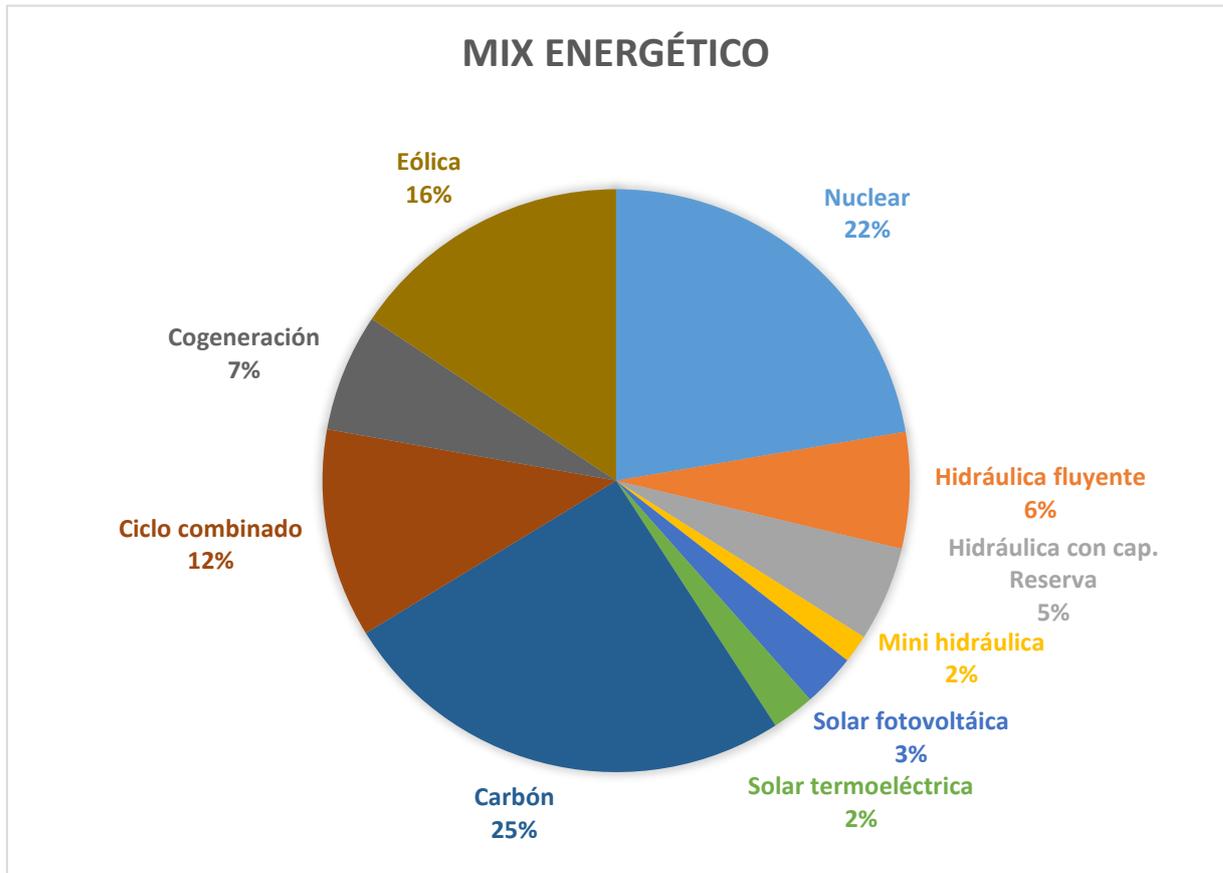


Figura 19. Mix energético con pleno desarrollo de centrales de tipo fluyente

Comparando este mix energético con el primer mix energético obtenido con la potencia actualmente instalada en España se pueden extraer conclusiones muy interesantes. Como era de esperar la producción hidráulica aumenta, y el peso en el mix (sin tener en cuenta el bombeo) es del 13%, ya que aunque la contribución de la mini hidráulica y la hidráulica con capacidad de reserva no haya aumentado, la producción de hidráulica fluyente ha crecido considerablemente. Como consecuencia de este aumento de energía limpia se ha reducido el peso del carbón en el mix, pasando del 27% al 25% un cambio que ha sido compensado con el aumento sorprendente del ciclo combinado, que ha pasado del 9% del mix al 12%.

Este aumento del ciclo combinado explica el porqué del aumento de emisiones.

Por otra parte la producción eólica y solar no cambia ya que generan energía siempre que se den las condiciones medioambientales correctas, a su vez la producción nuclear tampoco cambia debido a la manera de funcionar de las centrales nucleares las 8760 hora anuales.



Parece ser que el aumento de la producción hidráulica de tipo fluyente por sí sola no es capaz de sustituir un porcentaje lo suficientemente elevado de generación fósil que permita obtener valores de emisiones y de dependencia energética sostenibles para España.

El precio sombra de la energía se sitúa en 128.1 €/MWh, un valor que apenas ha disminuido con respecto a las anteriores simulaciones.

Forma de generación	Potencia instalada (MW)	Producción energética (GWh)	Peso en el mix (%)
Nuclear	7866	68906,16	22,89
Hidráulica fluyente	11000	11995,39	3,98
Hidráulica reserva	9690	16238,61	5,39
Mini hidráulica	1992	4828,8	1,60
Solar fotovoltaica	4667	9100,65	3,02
Solar térmica	2300	7249,6	2,40
Carbón	11482	78342,54	26,03
Ciclo combinado	27199	35797,44	11,89
Fuel oil	2784	0	0
Bombeo	3370	0	0
Cogeneración	7219	20192,27	6,70
Eólica	23000	48300	16,04
<b>Total</b>	<b>112569</b>	<b>300951,46</b>	<b>100</b>

<b>Emisiones asociadas a la producción (MtCO<sub>2</sub>)</b>	<b>85,63</b>
<b>Precio sombra de electricidad (€/MWh)</b>	<b>128,10</b>
<b>Dependencia energética (%)</b>	<b>87,69</b>
<b>Dependencia energética relativa (%)</b>	<b>67,53</b>

A continuación se procederá a realizar las simulaciones de como variaría la producción hidráulica de las centrales con capacidad de reserva en distintos escenarios para finalmente realizar simulaciones con la máxima potencia técnicamente extraíble del agua y comprobar distintas hipótesis acerca de la sostenibilidad y rentabilidad del sistema.



## 8.4 Cuarta simulación: centrales hidráulicas con capacidad de reserva

Este tipo de centrales son las que tienen capacidad para almacenar agua y poder usarla cuando sea necesario. Representan sólo el 20% en número de centrales hidráulicas de régimen ordinario, sin embargo, y debido a la gran potencia que son capaces de generar, este tipo de centrales produce prácticamente el 60% de toda la energía hidráulica nacional.

Las centrales con capacidad de reserva son imprescindibles para el sistema eléctrico español, por una parte son capaces de generar en cuestión de segundos cuando sea necesario, se pueden ajustar perfectamente a la curva de la demanda y además pueden cumplir una importantísima labor de regulación, contribuyendo a la regulación secundaria y terciaria.

Por otro lado la construcción de grandes presas es costoso y conlleva multitud de consecuencias medioambientales, pero esto se analizará posteriormente, ahora se procederá a analizar si es sostenible un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos.

<b>Forma de generación</b>	<b>Potencia instalada (GW)</b>	<b>Primera Hipótesis (GW)</b>	<b>Segunda Hipótesis (GW)</b>	<b>Tercera Hipótesis (GW)</b>
Nuclear	7,866	7,866	7,866	7,866
Carbón	11,482	11,482	11,482	11,482
Fuel/gas	2,784	2,784	2,784	2,784
Ciclo combinado	27,199	27,199	27,199	27,199
Eólica	23,003	23,003	23,003	23,003
Solar térmica	2,300	2,300	2,300	2,300
Solar fotovoltaica	4,667	4,667	4,667	4,667
Cogeneración	7,219	7,219	7,219	7,219
Hidráulica fluyente	6,640	6,640	6,640	6,640



<b>Hidráulica de reserva</b>	<b>9,690</b>	<b>9,690</b>	<b>10,5</b>	<b>20</b>
Mini hidráulica	1,920	1,920	1,920	1,920
Bombeo	3,371	3,371	3,371	3,371
<b>Total</b>	<b>107,963</b>	<b>107,963</b>	<b>108,763</b>	<b>118,263</b>

#### 8.4.1. Escenario actual según el IDAE: primera Hipótesis

Según el IDAE se estima que no va a haber un crecimiento de la potencia instalada en estas centrales para el 2020 si todo continúa el curso que lleva hoy por hoy, por lo que no merece la pena realizar esta simulación ya que los datos que se van a obtener serán idénticos a los que se obtuvieron en la primera simulación realizada.

#### 8.4.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda Hipótesis

En un escenario de desarrollo renovable óptimo el incremento de potencia hidráulica con capacidad de reserva para el 2020 debería ser de unos 800 MW.

A continuación se analizará si un incremento de 800MW en la potencia instalada hidráulica de este tipo traería cambios interesantes a España.

Potencia instalada 10,5 GW:

Respecto a la primera simulación realizada cabe destacar que la producción hidráulica de las centrales con capacidad de reserva pasa de 16234 GWh a 17396 GWh, este aumento era esperado ya que se aumentaba la potencia instalada considerablemente. Por otro lado, este aumento provoca una pequeña reducción de la producción de carbón, lo que sirve para ver que el modelo de sostenibilidad siempre trata de sustituir en la medida de lo posible el carbón por fuentes limpias. Consecuencia también de este ligero aumento de producción hidráulica se obtienen unas emisiones ligeramente inferiores a las anteriores, de 82,96 millones de toneladas y una dependencia todavía por encima del 88%.



### **8.4.3. Escenario futuro de pleno desarrollo hidráulico: tercera Hipótesis**

Este escenario consiste en un pleno aprovechamiento hidráulico de todos los recursos técnicamente útiles para producir energía. A su vez también tendrá en cuenta una pequeña reducción de estos recursos como consecuencia del cambio climático, ya que es un escenario que se plantea de cara al futuro, en torno al año 2030.

El potencial hídrico técnicamente aprovechable sin contar centrales mini hidráulicas y de bombeo está en torno a los 58900 GWh. Como también se sabe el 40% de este potencial sería aprovechado por centrales de río fluyente, por lo que quedarían alrededor de 35000GWh aprovechables. Este tipo de centrales con reserva de agua también se verán afectadas por las condiciones meteorológicas que habrá en el futuro como consecuencia del calentamiento global, sin embargo, el impacto que puede tener el clima en este tipo de centrales es menor que el que tendría en centrales de tipo fluyente. Por lo que se estima que la reducción del potencial hídrico de estas centrales estará en torno al 5%, dejando finalmente un potencial técnicamente aprovechable de algo más de 33.000 GWh anuales.

A continuación se realizarán las simulaciones adecuadas para observar cómo el aprovechamiento de esta producción podría ser beneficioso para el sistema energético español.

Para producir alrededor de 33.000 GWh al año a través de centrales hidráulicas con capacidad de reserva hará falta una potencia instalada de 20 GW como mínimo. Esta potencia representa casi el doble de la potencia que hay ahora mismo instalada en España en este tipo de centrales.

Los resultados obtenidos con una potencia instalada de 20 GW son lo menos llamativos, la producción hidráulica por centrales de reserva alcanza los 33.750 GWh, una cifra muy similar a la esperada en un principio, sin embargo hay una disminución considerable de la utilización de carbón y un aumento de la producción del ciclo combinado, este tipo de cambio ya ocurrió cuando se simuló la máxima potencia de las centrales de río fluyente.



El decrecimiento del carbón no provoca que la bajada de las emisiones sea considerable ya que se compensa con el aumento del ciclo combinado, situándose en 85 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. La dependencia energética alcanza su mínimo hasta el momento de las simulaciones con una cifra del 87,17%. La dependencia relativa está en el 64,35%, estudiando este parámetro se puede apreciar mejor como si disminuye la dependencia energética del exterior de una manera un poco más acuciada.

El precio sombra de la electricidad alcanza los 121.5 €/MWh, este valor es muy llamativo ya que prácticamente se ha reducido el precio de la energía eléctrica en 6.5 €/MWh, una disminución que ya podría notarse de manera positiva en la sociedad.

A continuación se analizara el mix energético resultante:

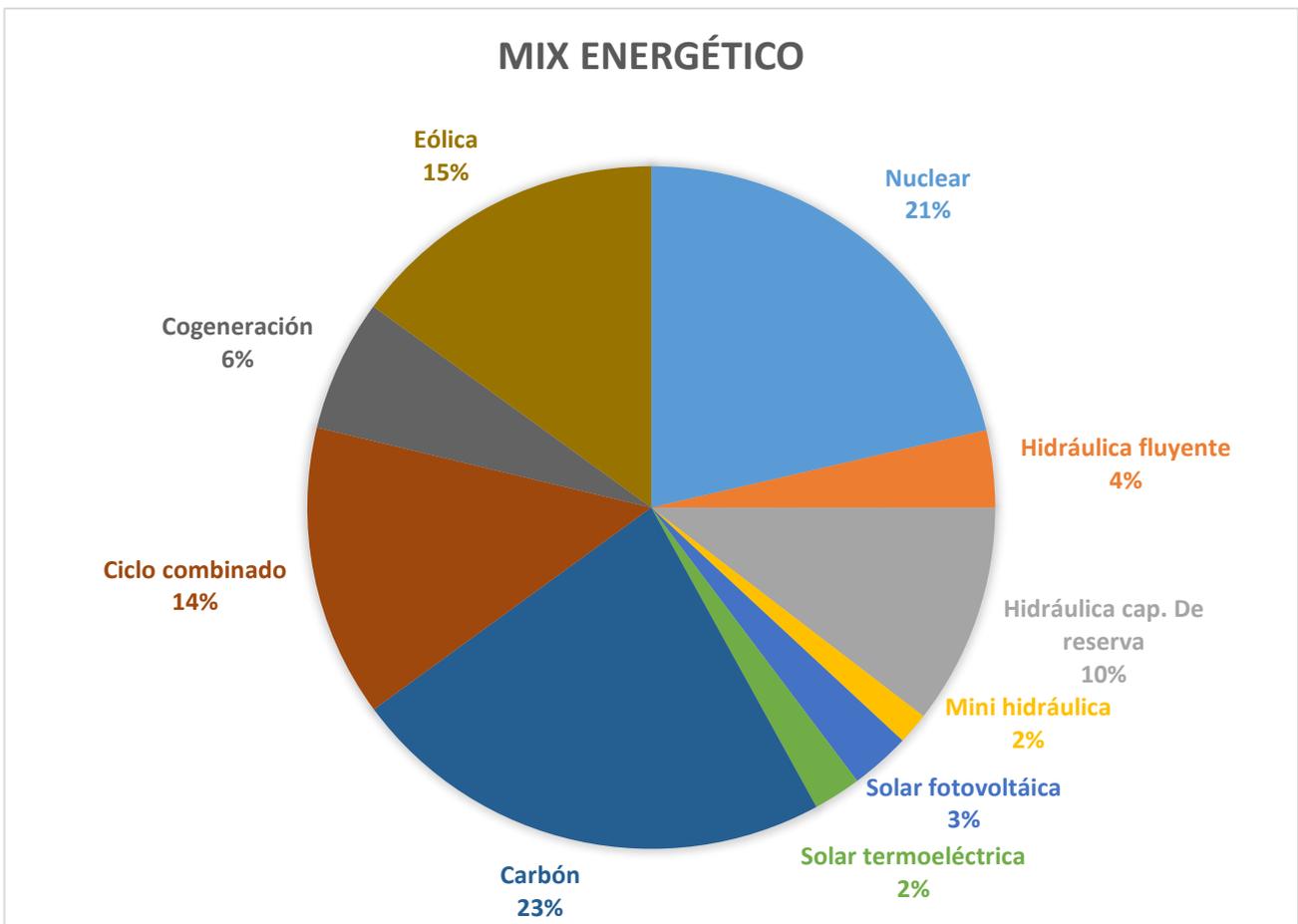


Figura 20. Mix energético de pleno desarrollo de centrales con cap. De reserva

El peso de la energía hidráulica comienza a ser importante, situándose en el 16% del mix total, mientras que las únicas formas de generación que varían son el ciclo



combinado y el carbón. El carbón baja considerablemente, pasando de un 27% a un 23% y reduciendo su producción en casi 9.000 GWh en comparación con la primera simulación realizada. En contraposición el ciclo combinado aumenta, pasando del 9% al 14%.

La manera de explicar este cambio puede ser el siguiente: el sistema trata de prescindir todo lo posible del carbón, ya que es una forma de generación claramente contaminante y que aumenta la dependencia exterior, sin embargo, es muy difícil ajustarse a la demanda nacional de forma correcta solo con el aumento de un tipo de hidráulica por cada simulación, por lo que el modelo se ve obligado a recurrir al ciclo combinado para satisfacer la demanda correctamente. Por otro lado hay que tener en cuenta que este es el posible mix energético del 2030 al completo, y durante un año hay estaciones o épocas en las que la producción hidráulica es más escasa, y tal vez en esas ocasiones el modelo recurre al ciclo combinado y todavía a una cifra alta de carbón.

Forma de generación	Potencia instalada (MW)	Producción energética (GWh)	Peso en el mix (%)
Nuclear	7866	68906,16	21,35
Hidráulica fluyente	6463	11800	3,65
Hidráulica reserva	20000	33714	10,44
Mini hidráulica	1922	4828,8	1,49
Solar fotovoltaica	4667	9100,65	2,82
Solar térmica	2300	7249,6	2,24
Carbón	11482	73876,23	22,89
Ciclo combinado	27199	44657,51	13,84
Fuel oil	2784	0	0
Bombeo	3371	0	0
Cogeneración	7219	20192,27	6,25
Eólica	23000	48300	14,97
<b>Total</b>	<b>118273</b>	<b>322625,23</b>	<b>100</b>

<b>Emisiones asociadas a la producción (MtCO<sub>2</sub>)</b>	<b>85,09</b>
<b>Precio sombra de electricidad (€/MWh)</b>	<b>121,51</b>
<b>Dependencia energética (%)</b>	<b>87,16</b>
<b>Dependencia energética relativa (%)</b>	<b>64,35</b>



Por último se procederá a realizar simulaciones donde la energía instalada se refiera a todo el potencial hidráulico que se ha ido viendo de manera separada, es decir escenarios actuales y óptimos según el IDAE de explotación hídrica para el 2020, y posibles escenarios futuros para el 2030 con la máxima energía técnicamente aprovechable de los recursos hídricos nacionales.

## 8.5 Quinta simulación:

En estas simulaciones se van a comprobar las hipótesis planteadas sobre la sostenibilidad de un mejor aprovechamiento del potencial hídrico, pero en vez de hacerlo de manera independiente como se ha hecho anteriormente con cada forma de generación hidráulica (sin incluir el bombeo, que se analizará más tarde), se hará con los tres tipos de centrales a la vez. Se espera que los resultados obtenidos puedan ser útiles para España consiguiendo un mix energético más sostenible donde se reduzcan las emisiones, la dependencia energética del exterior y el precio sombra de la electricidad.

Forma de generación	Potencia instalada (GW)	Primera Hipótesis (GW)	Segunda Hipótesis (GW)	Tercera Hipótesis (GW)
Nuclear	7,866	7,866	7,866	7,866
Carbón	11,482	11,482	11,482	11,482
Fuel/gas	2,784	2,784	2,784	2,784
Ciclo combinado	27,199	27,199	27,199	27,199
Eólica	23,003	23,003	23,003	23,003
Solar térmica	2,300	2,300	2,300	2,300
Solar fotovoltaica	4,667	4,667	4,667	4,667
Cogeneración	7,219	7,219	7,219	7,219
<b>Hidráulica fluyente</b>	<b>6,640</b>	<b>6,760</b>	<b>7</b>	<b>11</b>
<b>Hidráulica de reserva</b>	<b>9,690</b>	<b>9,690</b>	<b>10,5</b>	<b>20</b>
<b>Mini hidráulica</b>	<b>1,920</b>	<b>2,20</b>	<b>2,66</b>	<b>3,50</b>
Bombeo	3,371	3,371	3,371	3,371

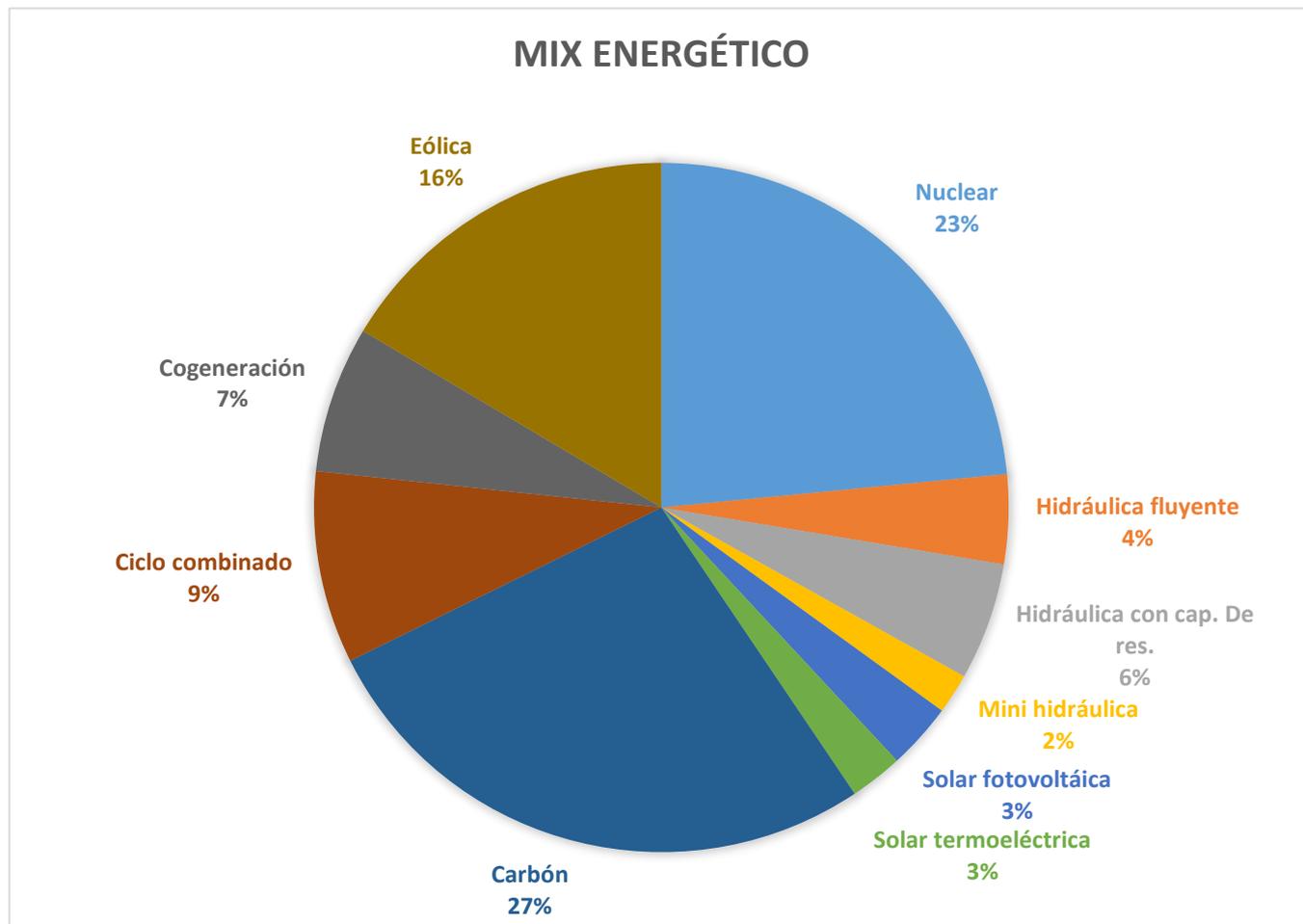


<b>Total</b>	<b>107,963</b>	<b>108,563</b>	<b>110,063</b>	<b>124,463</b>
--------------	----------------	----------------	----------------	----------------

### 8.5.1 Escenario actual según el IDAE: primera Hipótesis

En este escenario se plantea cómo podría ser el sistema energético nacional para el 2020 si no cambia nada la política energética que se está haciendo ahora mismo. Cosa que no parece que vaya a cambiar con tan poca antelación. En esta situación la inversión hidráulica es diminuta y los resultados que se obtendrán de esta simulación no se cree que vayan a ser muy distintos a los de la primera simulación realizada.

Según el IDAE en el escenario actual para el 2020, se estima que la potencia instalada de mini hidráulica sea de 2.200 MW, siendo actualmente de 1.900 MW. Mientras que de las otras dos tipos de centrales se espera que el aumento de su potencia instalada conjunta sea de alrededor de unos 300 MW, situando la potencia instalada conjunta de





centrales de régimen ordinario en unos 16.45 MW, cuando ahora es de 16.15 MW. Lo que es un crecimiento de la potencia instalada irrisorio.

Figura 21. Mix energético con la potencia hidráulica prevista por el IDAE para el 2020 en un escenario actual.

Los resultados obtenidos son muy similares a los de la primera simulación con el potencial actualmente instalado. La producción mini hidráulica y del tipo fluyente ha aumentado pero muy poco como para tener efectos en el mix energético total. Por otra parte, en cuanto a las emisiones contaminantes estas están en 82.9 millones de toneladas, una cifra que sigue alta pero que es menor a la obtenida en la primera simulación, y esto se debe a que aunque haya sido poco, la producción hidráulica aumentada ha disminuido la producción de carbón. La dependencia se sitúa en el 88.12%, un valor ligeramente más bajo que el que se podría esperar de la primera simulación.

### **8.5.2. Escenario óptimo según el IDAE: segunda Hipótesis**

Este sería el escenario que podría darse en España para el 2020 si se llevasen a cabo las medidas ya mencionadas en el apartado de potencial hidráulico.

El incremento de potencia está todavía lejos de todo el potencial hídrico que hay en España pero aun así puedan provocar cambios en las características que se están estudiando en estas simulaciones.

La potencia instalada hidráulica pasa de 18.65 GW, donde 2.2 GW eran de mini hidráulica, 6.75 GW de hidráulica fluyente y 9.7 GW de hidráulica con capacidad de reserva, a 20.16 GW, donde la distribución es de 2.66GW para mini hidráulica 7 GW para centrales de tipo fluyente y 10.5 GW para centrales con capacidad de reserva.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

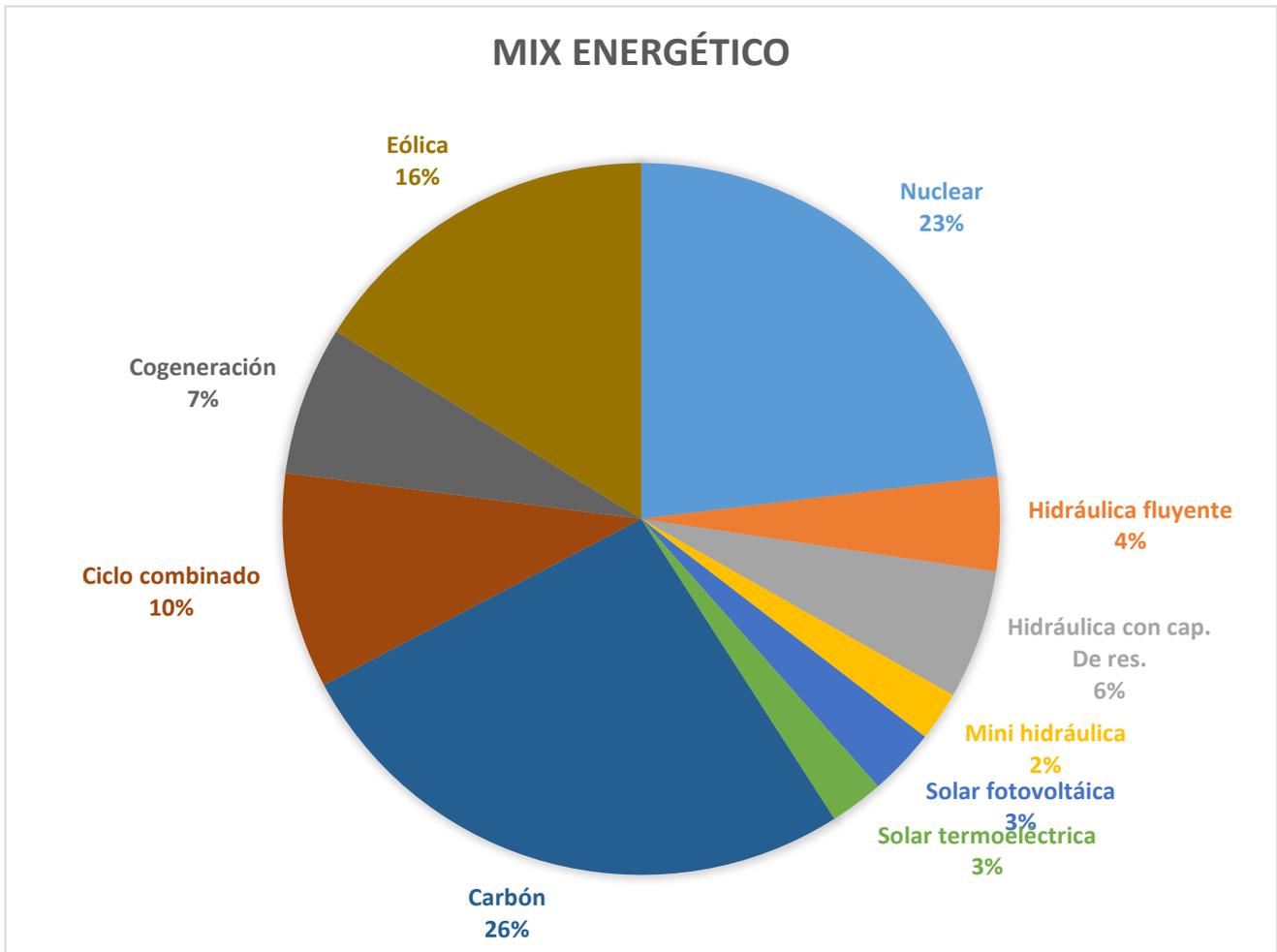


Figura 22. Mix energético con la potencia hidráulica prevista por el IDAE para el 2020 en un escenario óptimo.

A pesar de que la producción hidráulica ha aumentado en 2.590 GWh anuales, pasando de 34.034 GWh a 36.624 GWh la distribución energética no ha cambiado prácticamente. Lo único destacable es que el carbón ha perdido un 1% de peso mientras que, como ya iba ocurriendo en anteriores simulaciones, ese porcentaje lo ha ganado el ciclo combinado.

La dependencia energética se sitúa por debajo del 88%, en un 87.96% mientras que las emisiones se colocan en 83.24 millones de toneladas anuales.



### **8.5.3 Escenario futuro de pleno desarrollo hidráulico:** **tercera Hipótesis**

En este escenario se plantea la hipótesis de cómo sería el mix energético y los niveles de emisiones y de dependencia energética si para el año 2030 España tuviese un pleno desarrollo hidráulico gracias al cual se pudiera aprovechar de manera sostenible todos los recursos hídricos explotables. Se estima que de estos recursos se podría obtener hasta 65.600 GWh, una cifra que prácticamente dobla las producciones energéticas obtenidas en la anterior simulación del escenario óptimo según el IDAE para el 2020. Se deberá tener en cuenta que este escenario que se supone actualmente podría ser posible en el 2030 si además hubiese una serie de cambios que permitiesen este desarrollo.

Teniendo en cuenta los cambios climatológicos que deparan a España para el futuro habrá que considerar una pequeña reducción de los recursos hídricos disponibles, como ya se explicó con anterioridad.

Las potencias instaladas de los tres tipos de centrales hidráulicas (sin incluir el bombeo) deberán ser de 20 GW para las centrales con capacidad de reserva, 11 GW para las centrales del tipo fluyente y alrededor de 3 GW para las mini hidráulicas.

Los resultados obtenidos son realmente positivos en cuanto a la sostenibilidad se refiere. Las emisiones asociadas a la generación de energía se han reducido un 10% llegando a los 75.97 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, en cuanto a la dependencia energética, ésta alcanza el valor más bajo hasta el momento, situándose en el 86.35% una cifra que todavía es alta pero que difícilmente se podrá hacer que disminuya más debido a la gran dependencia que el sector transportes tiene de los combustibles fósiles. Teniendo en cuenta simplemente la generación eléctrica, la dependencia energética se sitúa en el 61%, lo que significa que casi un 40% de toda la producción energética es renovable.

En cuanto a las formas de generación renovables cabe destacar que la producción hidráulica alcanza los 60.5 GWh anuales, un 7% menos del máximo potencial técnicamente aprovechable, esta pequeña diferencia se debe principalmente a la reducción del agua debido al cambio climático. La producción eólica y solar permanece constantes ya que no se ha previsto un aumento de la potencia instalada.



En lo que respecta a las formas de generación no renovables hay que destacar la disminución del uso del carbón, pasando de 80.000 GWh en la primera simulación a 63.931 GWh en este escenario. Lo que hace que sea comprensible esa disminución de las emisiones y la dependencia energética que se acaba de ver. La producción el ciclo combinado aumenta considerablemente hasta los 44.000 GWh, un valor alto en comparación con la primera simulación pero que confirma la tendencia vista durante estas simulaciones donde el ciclo combinado trataba de compensar de alguna forma la bajada del carbón.

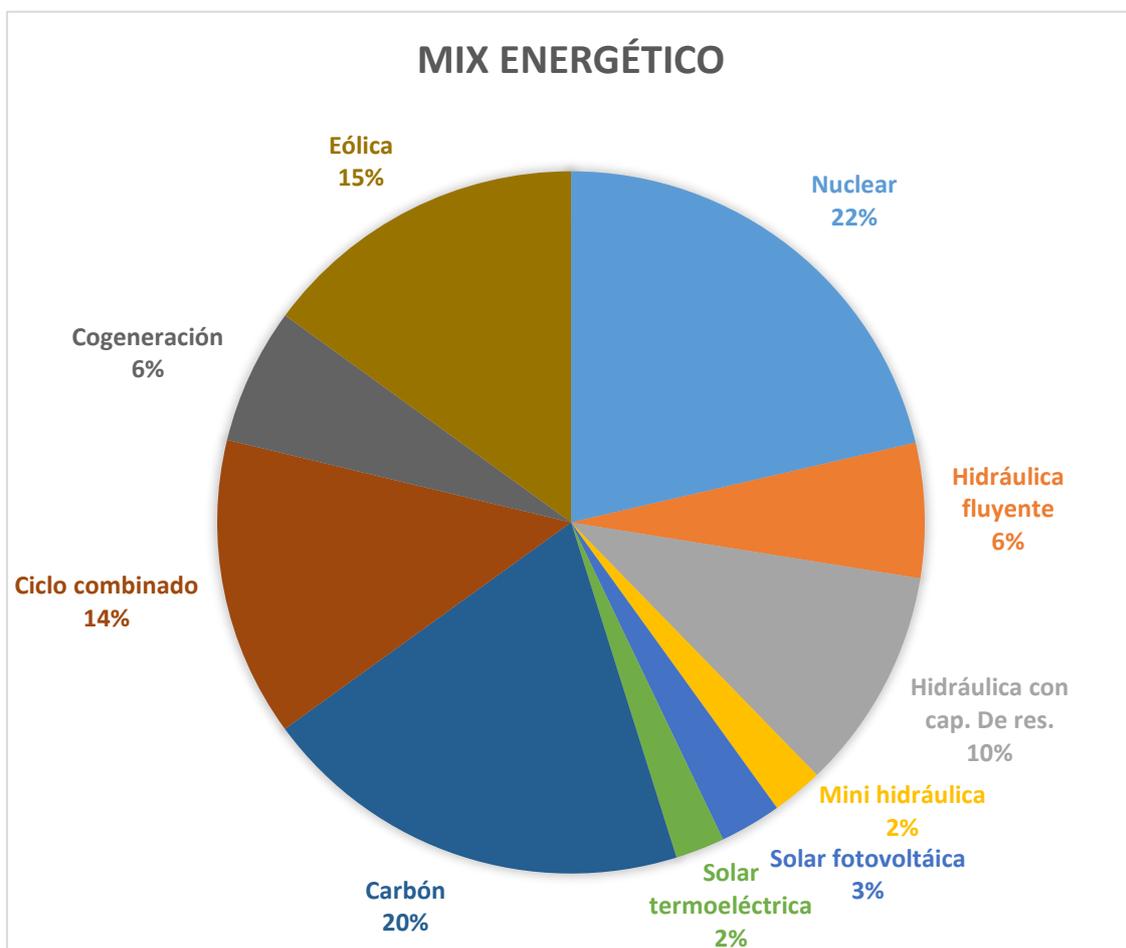


Figura 23. Mix energético de pleno desarrollo hidráulico para el 2030.

El peso de la producción hidráulica en el mix es ya del 18%, y eso que no se está teniendo en cuenta la generación por bombeo en estas simulaciones. El peso del carbón pasa del 27% al 20% lo que es un hito realmente sostenible.

Por otro lado, la producción nuclear permanece constante pero quizá sea interesante analizar cómo podría ser el mix y el sistema energético con la progresiva eliminación de



las centrales nucleares, ya que a día de hoy y si todo sigue su curso establecido, España será un país libre de generación nuclear para finales de los años 30.

La producción energética con estos parámetros de pleno desarrollo hidráulico es de 322.724 GWh anuales, en contraposición con la producción energética de la primera simulación con la potencia actualmente instalada que era de 293.793 GWh. Este incremento de potencia se debe básicamente al aumento de la producción hidráulica. Por otra parte, hay un trade-off entre el gas y el carbón, lo que disminuye el carbón lo asume el ciclo combinado, que es una forma de generación mucho más eficiente y menos contaminante. Es interesante destacar que este aumento de la producción energética se ha conseguido sin emitir ni un solo gramo de CO<sub>2</sub>, es mas, se ha logrado reduciendo las emisiones un 10%.

Este aumento de la producción tiene un significado llamativo, lo que puede estar pasando es que el sistema energético se ha electrificado. Si se analizasen los usos finales de la energía seguramente se observaría un incremento de los transportes híbridos o eléctricos enchufables, junto con un aumento de la calefacción con bomba de calor. En definitiva, se han electrificado los usos finales de la energía gracias a la producción hidráulica extra, con la consiguiente mejora de calidad de vida de los habitantes de España.

Otro dato reseñable y que merece la pena destacar es el valor que adquiere el precio sombra de la electricidad. El precio sombra de un bien es el precio de referencia que tendría ese bien en condiciones de competencia perfecta, incluyendo los costos sociales además de los privados. En este caso y como se puede observar en la última simulación con el mayor potencial hidráulico el precio sombra de la electricidad disminuye, pasando de 0.128 €/KWh a 0.120 €/KWh. Este decremento no es mucho pero en condiciones que la regulación lo permitiera, se podría trasladar al consumidor y aliviar la carga de muchas familias.

Hay que ser cauto a la hora de interpretar los resultados obtenidos a través de estas simulaciones, ya que son resultados procedentes de un modelo de simulación bastante complejo pero que obviamente tiene carencias, y aunque lo que se ha tratado de comparar y analizar son valores objetivos como puedan ser por ejemplo el nivel de emisiones o el precio de la energía, hay que saber que estos valores quizá no sean los mismo si se llevase a cabo este mix en la realidad.



Forma de generación	Potencia instalada (MW)	Producción energética (GWh)	Peso en el mix (%)
Nuclear	7866	68906,16	21,35
Hidráulica fluyente	11000	20008	6,19
Hidráulica reserva	20000	32992	10,22
Mini hidráulica	3000	7545	2,33
Solar fotovoltaica	4667	9100,65	2,82
Solar térmica	2300	7249,6	2,24
Carbón	11482	63931,85	19,81
Ciclo combinado	27199	44498,39	13,78
Fuel oil	2784	0	0
Bombeo	3371	0	0
Cogeneración	7219	20192,27	6,25
Eólica	23000	48300	14,96
<b>Total</b>	<b>123888</b>	<b>322723,93</b>	<b>100</b>

<b>Emisiones asociadas a la producción (MtCO<sub>2</sub>)</b>	<b>75,97</b>
<b>Precio sombra de electricidad (€/MWh)</b>	<b>120,56</b>
<b>Dependencia energética (%)</b>	<b>86,35</b>
<b>Dependencia energética relativa (%)</b>	<b>61,20</b>

En cuanto al bombeo, no se tiene en cuenta su contribución al mix energético ya que su balance de energía consumida-generada es negativo, es decir, consume más de la que genera, por lo que se incluye simplemente como energía consumida por el sistema. Sin embargo su contribución al correcto funcionamiento y eficiencia del sistema se analizará en profundidad posteriormente, al igual que su previsión de potencial a instalar en España.

Una vez observados todos los resultados cabe destacar la imposibilidad de reducir la dependencia energética nacional de manera significativa. Esto es básicamente debido a la tremenda necesidad que tiene España de importar combustibles fósiles para poder satisfacer su demanda energética de los sectores transportes e industria.



## 8.6 sexta simulación:

Podría ser interesante realizar alguna simulación más con el máximo potencial hidráulico aprovechable pero imponiendo a su vez la imposibilidad de generar a través de carbón, por ejemplo, y observar y determinar si un aprovechamiento hidráulico eficiente podría permitir prescindir de alguna forma de generación contaminante, cara e ineficiente.

Un detalle importante a tener en cuenta es que el modelo siempre prescinde de la generación a través de fuel-oil. Esto se debe a que esta forma de generación no es sostenible, es ineficiente y contamina y actualmente es prácticamente sólo usada en España en sistema insulares por lo que el modelo siempre trata de prescindir de esta forma de generación.

### 8.6.1 Máximo aprovechamiento hidráulico y prescindir al completo del carbón:

A continuación se simulará el mix energético de máximo aprovechamiento hidráulico, con las potencias instaladas y producciones ya vistas anteriormente, pero sin embargo se prescindirá absolutamente de la generación a través del carbón. Se analizarán los datos obtenidos ya que pueden ser muy interesantes:

Los resultados obtenidos son bastante llamativos. Sin producción energética a través del carbón las emisiones asociadas a la generación disminuyen drásticamente hasta las 30.67 millones de toneladas, lo que es una cifra increíblemente baja en comparación con el nivel actual de emisiones, que se sitúa alrededor de 83 millones de toneladas.

En cuanto a la dependencia energética los resultados son positivos aunque lejos de permitir cumplir objetivos importantes a España. La dependencia se sitúa en el 84.71%, casi un 4% menor que la obtenida con la simulación de la potencia actualmente instalada.

Por último, se analizará el precio sombra de la electricidad, donde se ha obtenido un resultado a priori inesperado, ya que se pensaba que si se prescindía de carbón el precio de la energía bajaría, pensamiento completamente equivocado ya que el precio sombra de la electricidad obtenido es de 154.64 € por cada MWh. Este valor es excesivamente alto, y es hasta 34€ mayor que el obtenido en la última simulación, que fue de 120.56 €/MWh.



Este incremento del precio tan alto de la energía hace que este mix no pueda ser rentable o asumible para la población a pesar de los importantes resultados obtenidos en materia medio ambiental y dependencia energética.

Forma de generación	Potencia instalada (MW)	Producción energética (GWh)	Peso en el mix (%)
Nuclear	7866	68906,16	23,68
Hidráulica fluyente	11000	20008	6,87
Hidráulica reserva	20000	32992	11,33
Mini hidráulica	3000	7545	2,59
Solar fotovoltaica	4667	9100,65	3,12
Solar térmica	2300	7249,6	2,49
Carbón	0	0	0
Ciclo combinado	27199	76683,99	26,35
Fuel oil	2784	0	0
Bombeo	3371	0	0
Cogeneración	7219	20192,27	6,93
Eólica	23000	48300	16,59
<b>Total</b>	<b>112406</b>	<b>290977,67</b>	<b>100</b>

<b>Emisiones asociadas a la producción (MtCO<sub>2</sub>)</b>	<b>30,67</b>
<b>Precio sombra de electricidad (€/MWh)</b>	<b>154,64</b>
<b>Dependencia energética (%)</b>	<b>84,71</b>
<b>Dependencia energética relativa (%)</b>	<b>56,97</b>

Observando la producción de ciclo combinado se observa que es un valor altísimo, con un peso en el mix de 26,35%, este hecho sigue fundamentando algunos resultados obtenidos a través de otras simulaciones, donde si la producción energética del carbón disminuía, la del ciclo combinado aumentaba prácticamente en una proporción parecida. Este valor tan alto de producción del ciclo combinado es lo que provoca un precio sombra de la electricidad tan alto, ya que el precio de cada MWh producido se asigna mediante el precio marginal de casación de la última forma de generación que entra en la red. Los ciclos combinados suelen ser de las últimas formas de generación en entrar en la red y su precio es bastante elevado, por lo que depender tanto del ciclo combinado provoca que el precio sombra de la electricidad se dispare.



## 8.6.2 Máximo aprovechamiento hidráulico y equilibrio entre carbón y ciclo combinado:

Tal vez sería interesante analizar otra posibilidad que permita obtener unos resultados que por un lado reduzcan emisiones y la dependencia energética pero que a su vez permitan un precio sombra de la electricidad relativamente bajo. Este posible equilibrio se va a tratar de buscar a través de una simulación donde la potencia instalada de ciclo combinado y se carbón se dejará como incógnita, permitiendo al modelo instalar lo que el crea conveniente para obtener los resultados más sostenibles posibles. Mientras tanto la producción hidráulica será la máxima técnicamente aprovechable, y la potencia instalada de las demás formas de generación se dejarán como están actualmente.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Forma de generación	Potencia instalada (MW)	Producción energética (GWh)	Peso en el mix (%)
Nuclear	7866	68906,16	23,52
Hidráulica fluyente	11000	20008	6,82
Hidráulica reserva	20000	32992	11,26
Mini hidráulica	3000	7545	2,57
Solar fotovoltaica	4667	9100,65	3,10
Solar térmica	2300	7249,6	2,47
Carbón	5068,32877	43612,30	14,88
Ciclo combinado	4872,66361	35047,14	11,96
Fuel oil	2784	0	0
Bombeo	3371	0	0
Cogeneración	7219	20192,27	6,89
Eólica	23000	48300	16,48
Total	95147,9924	292953,13	100

<b>Emisiones asociadas a la producción (MtCO<sub>2</sub>)</b>	<b>53,70</b>
<b>Precio sombra de electricidad (€/MWh)</b>	<b>147,10</b>
<b>Dependencia energética (%)</b>	<b>85,50</b>
<b>Dependencia energética relativa (%)</b>	<b>57,26</b>



Como puede observarse, en estas condiciones el modelo ha decidido instalar una potencia de carbón de 5.068 GW y 4.872 GW de ciclo combinado. Estos valores son bastante llamativos en contraste con los que hay actualmente instalados en España ya que hay 11.482 GW instalados de carbón y 27.199 GW de ciclo combinado. Pero por ejemplo, el ciclo combinado con 5 veces más de potencia instalada, actualmente produce menos que los 35.047 GWh que se han producido en esta simulación, esto significa que a día de hoy los ciclos combinados en España están funcionando muy por debajo de su máxima capacidad pero esto se explica de la manera que cuanto más se produzca mediante esta forma de generación, más alto será el precio de la energía, como bien se puede observar aquí, donde el precio sombra de la electricidad es 147.10 €/MWh, mientras que en las condiciones actuales es de 128 €/MWh y con el máximo aprovechamiento hidráulico es de 120 €/MWh.

En cuanto a la dependencia energética y a las emisiones se obtienen resultados positivos. Las emisiones se sitúan tan solo en 53.70 millones y la dependencia en el 85.5 %. Este valor de dependencia total sigue siendo alto pero habrá que analizarlo relativamente sin tener en cuenta todo el sector energético total si no sólo la generación energética.

El sistema de casación del mercado eléctrico provoca que sea difícil encontrar un equilibrio entre un mix con mínimo impacto medio ambiental y un mix con un precio sombra de la electricidad barato. Prescindir del carbón disminuye las emisiones notablemente pero sin embargo provoca que los ciclos combinados provoquen una subida del precio sombra de la electricidad. Por el otro lado un mix con demasiado peso del carbón es tremendamente insostenible.

Parece ser que un mix con la potencia actualmente instalada pero con un mejor aprovechamiento hidráulico sería lo más ventajoso para España.

### **Conclusiones:**

Analizando detenidamente estas distribuciones energéticas y los parámetros que se han escogido se puede concluir con que manteniendo la potencia actualmente instalada y aprovechando el potencial hidráulico disponible en España se podrían reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta un 10%, con sus consiguientes beneficios para el medio ambiente y los ciudadanos. La dependencia energética total disminuiría muy poco, algo menos de un 2% pero la dependencia energética relativa disminuiría hasta un 5.6%. El



precio sombra de la electricidad también disminuiría alcanzando el mínimo obtenido en cualquier simulación, bajando hasta 8 euros por MWh y situándose en los 120 €/MWh lo que podría llegar a repercutir directamente a los ciudadanos disminuyendo el precio de sus facturas.

Un mejor aprovechamiento hidráulico podría traer numerosos beneficios a un país como España.

## **9. Hidráulica de bombeo**

El bombeo hidráulico es, a día de hoy, la única forma de almacenamiento de grandes cantidades de energía. Su funcionamiento ya se ha explicado al comienzo de este proyecto, pero básicamente consiste en turbinar agua en las horas punta de la demanda, cuando el precio de la energía es más alto, y bombear el agua de vuelta a un embalse superior en los valles de la demanda, cuando el precio es más bajo.

En esta sección del proyecto se va a analizar en profundidad las ventajas del bombeo y como sus características pueden ser muy beneficiosas para el sistema eléctrico español.

Actualmente en España hay instalados 3.371 MW de bombeo hidráulico, pero según el Plan De Energías Renovables del IDAE se espera que esta potencia instalada aumente considerablemente en un futuro muy cercano, llegando en el 2020 a los 5.700 MW de potencia instalada en el escenario de desarrollo hidráulico actual y hasta los 8.850 MW en un posible escenario de desarrollo hidráulico óptimo.

Bien es cierto, que el bombeo no es considerado una forma de generación energética como tal, ya que, aunque genera energía, también la consume, y se consume más energía de la que se genera debido al menor rendimiento que tiene la bomba frente a la turbina, por ejemplo en el 2015 en España el consumo por bombeo fue de 4.497 GWh.

En definitiva una central de bombeo es una inmensa batería con capacidad para almacenar grandes cantidades de energía con un rendimiento considerablemente alto, que está alrededor del 70%, y que además es económicamente rentable. Esta función como inmensa batería le otorga a la energía hidráulica de bombeo la posibilidad de contribuir a la gestión eficiente del sistema, como se verá a continuación.



Para poder mejorar la eficiencia del sistema eléctrico y la calidad del suministro es de vital importancia conseguir integrar en la red la energía renovable no gestionable, actualmente esto sólo es posible a través de un desarrollo de los sistemas de acumulación de electricidad, como el bombeo, que gracias a su madurez tecnológica y comercial, a su gran flexibilidad y a la óptima calidad de la electricidad vertida es en este momento la única solución capaz de contribuir a este fin. La principal función del bombeo debe ser la de ayudar a la gestión del sistema y no la de generar energía eléctrica, por lo que se deberán establecer las condiciones económicas necesarias para realizar esta función.

Debido al aumento de la producción renovable no gestionable en España es completamente necesario la ayuda de la energía hidráulica de bombeo para su integración en la red. El funcionamiento del bombeo para facilitar la integración de estas formas de generación no gestionables en la red es el siguiente: en las horas o momentos de baja producción el bombeo deberá turbinar agua generando energía que supla esta escasez de generación por parte de la eólica y la solar fotovoltaica, mientras que en los momentos que haya excedentes de producción las centrales de bombeo deberán bombear el agua de vuelta. De esta manera se consigue una integración de las energías renovables muy importantes para ahorrar costes y optimizar el aprovechamiento eólico.

Una función que puede llegar a ser muy beneficiosa para el sistema eléctrico, y que es también fruto de las características de la energía hidráulica de bombeo es el aplanamiento de la curva de la demanda.

La curva de la demanda representa la cantidad de energía que requieren los usuarios a lo largo del día y tiene una forma característica en cada país, ya que depende de entre otras variables de la economía del país, de la estación del año, la meteorología, la cultura y la situación del país. En España, se aprecian dos modelos diferenciados en la curva de la demanda, uno para invierno y otro para verano, las diferencias entre estos, es la hora en la que se obtiene la punta de demanda y el número de picos que posee esta curva. Mientras que en invierno la curva de demanda tiene dos picos diferenciados, uno en torno a las 11 de la mañana y otro a las 8 de la tarde tal como se puede ver en la primera figura siguiente, en verano, sin embargo la curva tiene un pico bien diferenciado a las 13 horas, tal como se puede ver en la segunda figura.

La representación de estas curvas es la siguiente:

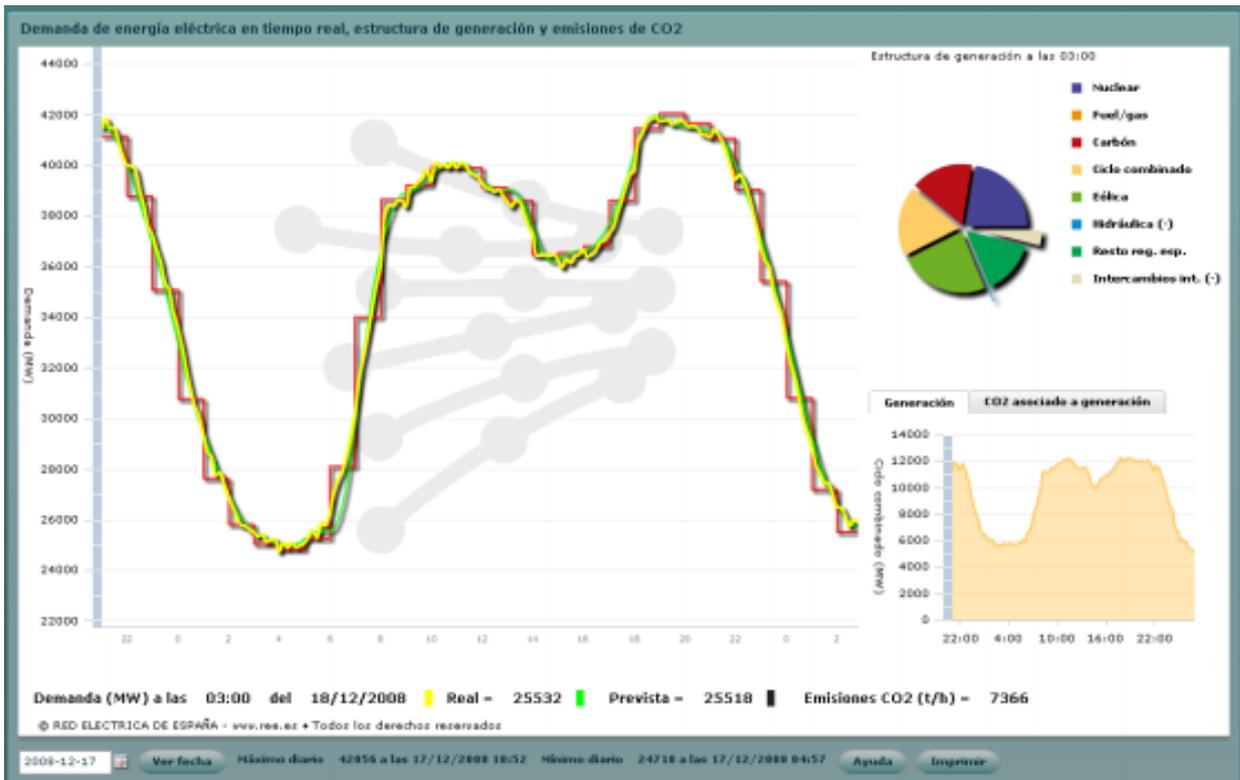


Figura 31. Curva de demanda para el 17/12/2008

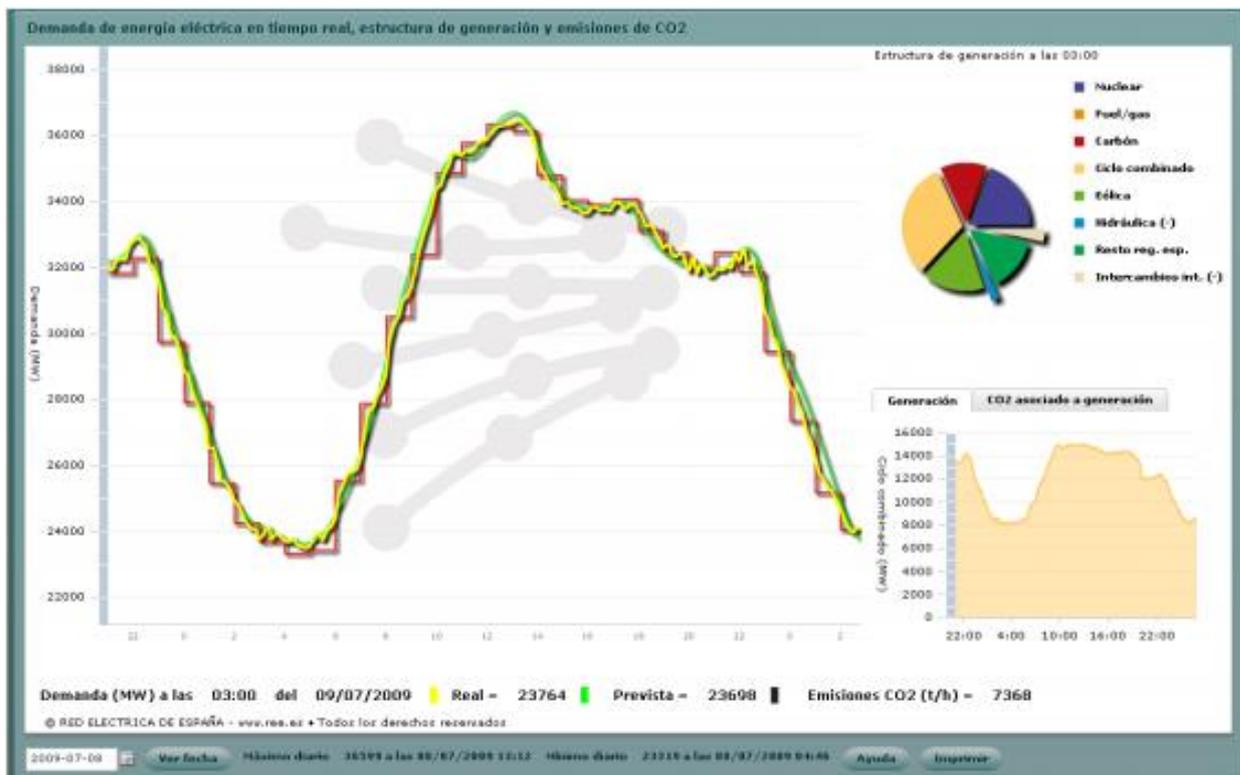


Figura 32. Curva de demanda para el 08/07/2008



Las anteriores curvas pueden ser más o menos pronunciadas dependiendo del día pero básicamente ambas representan una curva demanda media de invierno y de verano en España.

La eficacia de un sistema eléctrico viene determinada en gran medida por la adecuación de las previsiones de demanda del operador del sistema a la demanda real del mercado, esta aproximación es, por lo general, bastante precisa, pero siempre podría serlo más. La eficiencia total del sistema se podría alcanzar si se consiguiera achatar al máximo los picos de la máxima demanda que se producen en el día a día, ya que de esta forma se demandaría siempre la misma cantidad de energía a cualquier hora del día, de tal manera que se tendría un absoluto control sobre la producción de energía necesaria para cubrir esa demanda.

¿Cómo se podría lograr aplanar la curva de demanda y que ventajas tendría para el sistema eléctrico esta acción?

Aplanar la curva de la demanda consiste básicamente en trasladar parte de la demanda de las horas punta a las horas base. Conseguir esto mediante la energía hidráulica de bombeo puede resultar bastante sencillo ya que en las horas valle se podría consumir energía bombeando el agua, haciendo así que el valle fuese menos pronunciado para luego turbinarla en los momentos de picos de demanda que fuera necesario, reduciendo de esta forma el precio de la energía en las horas punta que actualmente es muy alta debido al alto coste de la materia prima de los ciclos combinados. Este aplanamiento de la demanda tiene beneficios importantes sobre el sistema eléctrico y sobre las formas de generación, ya que al ser la curva de demanda lo más plana posible se obtiene un mejor control sobre la previsión, permitiendo a los grupos energéticos con menor capacidad de regulación de funcionar de manera óptima, alargando su vida y mejorando su rendimiento.

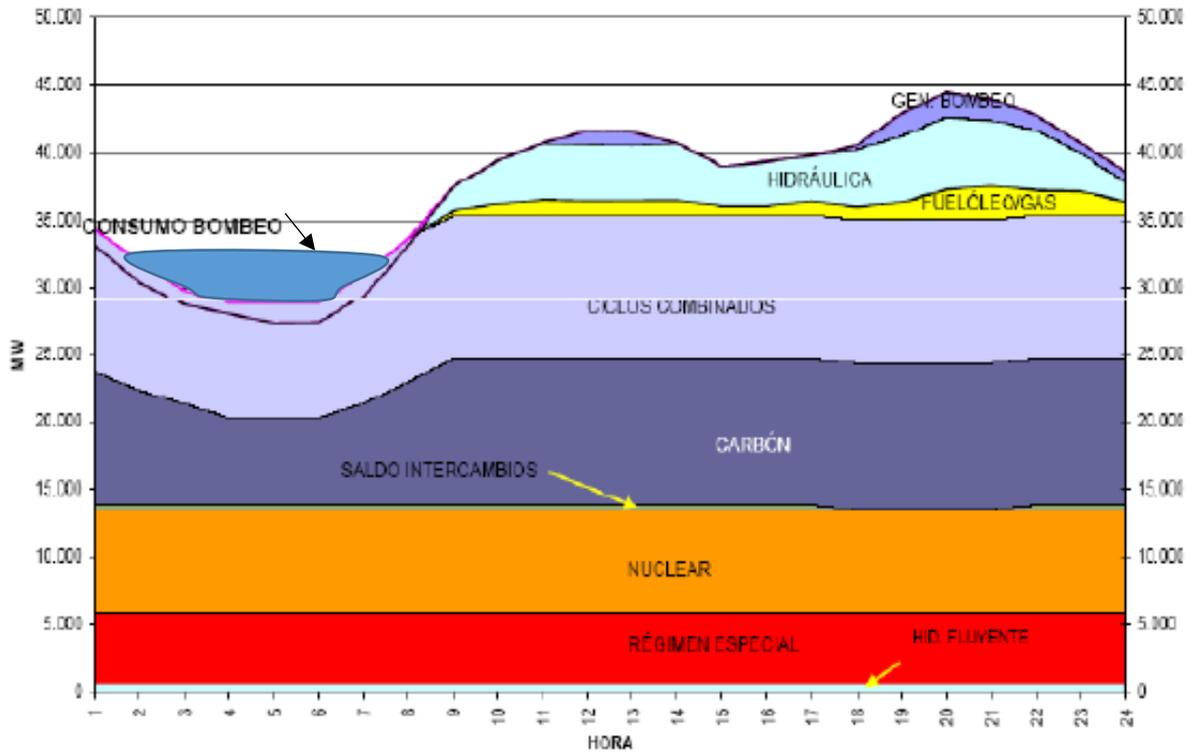


Figura 33. Curva de demanda y contribución del bombeo a su “aplanamiento”

Parece que la instalación de centrales de bombeo en España es algo muy beneficioso, tanto por la posibilidad que permite de almacenar gran cantidad de energía, como por su importancia a la hora de integrar formas de generación renovable no regulable y por su capacidad para aplanar la curva de la demanda. En definitiva, las centrales hidráulicas de bombeo son esenciales para mejorar la eficiencia, estabilidad y operación del sistema eléctrico, y a su vez, son centrales no contaminantes.

Después de analizar todo lo mencionado se puede decir que el bombeo es esencial para en un futuro obtener sistemas eléctricos sostenibles y eficientes y es por ello que la previsión del IDAE para esta forma de energía hidráulica es tan llamativa en comparación con la potencia instalada actualmente, ya que en un escenario óptimo de desarrollo hidráulico se espera que la potencia de bombeo prácticamente se triplique para el 2020.



## 10. Barreras al desarrollo hidráulico

Para el desarrollo de nuevo potencial hidroeléctrico, las principales barreras detectadas son de recurso hidráulico y de tipo administrativo-medioambiental.

### Barreras de recurso hidráulico

- La falta de conocimiento en detalle del potencial de recurso hidráulico por emplazamientos, dificulta o ralentiza la realización de proyectos. Existen todavía muchos emplazamientos en infraestructuras existentes (por ejemplo, en el Convenio entre el MARM y el IDAE de diciembre de 2007 se identificaron 41 presas de titularidad estatal) o en zonas de mínima afección medioambiental, que pueden ser susceptibles de aprovechar hidroeléctricamente, de forma compatible con otros usos y desarrollables con criterios de sostenibilidad.
- Disminución de los recursos hídricos, por efecto del cambio climático, que afectará a la producción hidroeléctrica. Como ya se ha comentado en el apartado de evaluación del potencial, esta futura disminución de las aportaciones hidrológicas afectará sobre todo a las centrales hidroeléctricas de tipo fluyente, que no tienen capacidad de regulación y se traducirá en una disminución en las horas equivalentes de funcionamiento.

### Barreras administrativas

- Largas demoras para la obtención de las concesiones necesarias para el uso del agua, debido, entre otros motivos, a la dificultad para obtener la autorización medioambiental previa necesaria. Para el otorgamiento de la concesión de aguas para uso hidroeléctrico es condición necesaria que el proyecto haya obtenido la Declaración de Impacto Ambiental favorable por parte del Organismo ambiental. Fundamentalmente, dentro del proceso de tramitación concesional, largo y complicado, la mayor dificultad se encuentra en la obtención de la Declaración de Impacto Ambiental por parte del Organismo ambiental competente, ya que se vienen produciendo demoras de casi 2 años, lo que hace que el proceso global pueda llegar a durar hasta 10 años, desanimando a los inversores potenciales que preferirán otros proyectos más atractivos. También son comunes las



dificultades en lograr conexiones a la red asequibles y no existen procedimientos rápidos para proyectos más pequeños.

- Oposición al otorgamiento de nuevas concesiones de agua de tipo fluyente por parte de determinados Organismos de Cuenca. Actualmente, la interpretación de la Directiva Marco del Agua (DMA) está provocando sensibilidades en algún Organismo de Cuenca contrarias a la explotación de aprovechamientos hidroeléctricos existentes y al futuro desarrollo de los mismos. El objetivo de esta Directiva es establecer un marco para la protección de las aguas continentales, costeras y subterráneas, que promueve un uso sostenible del agua, contribuye a paliar los efectos de inundaciones y sequías, mejora el medio acuático reduciendo vertidos y emisiones y previene todo deterioro adicional, mejorando el estado de los ecosistemas acuáticos y terrestres. En este sentido, la implantación de la DMA puede impedir el desarrollo del potencial fluyente disponible en cauce de ríos y la eliminación de minicentrales en desuso. Por otro lado, el establecimiento de los caudales de mantenimiento que se fijan en los instrumentos de planificación hidrológica puede afectar, en mayor o menor medida, a nuevos proyectos y a centrales en funcionamiento si los valores fijados son muy altos.
- Dificultades para la renovación del período de concesión de aguas en las centrales hidroeléctricas existentes. La no renovación de las concesiones puede derivar en abandono y sub-inversión de las plantas existentes durante los últimos años de explotación de las mismas.
- Procedimiento de tramitación concesional complejo, incluso para proyectos pequeños.
- Dificultades para la obtención de las autorizaciones necesarias de los Organismos regionales y locales.
- Dificultades en lograr conexiones a red asequibles.



## 11. Impacto medio ambiental de la energía hidráulica:

La energía hidráulica es una forma de generación renovable, limpia, es decir, permite generar electricidad sin provocar residuos o emitir gases contaminantes, es autóctona y la capacidad de algunas centrales de almacenamiento y de regulación es esencial para la eficiencia del sistema eléctrico, sin embargo, la construcción y operación de las centrales hidráulicas (sobre todo de las más grandes) conlleva impactos ambientales y sociales que hay que tratar de cuantificar para poder evitarlos, minimizarlos y repararlos.

A continuación se analizará que tipo de afecciones sociales y medio ambientales provoca la construcción de infraestructuras para el aprovechamiento hidráulico y como se pueden evitar o solucionar estos problemas para hacer un aprovechamiento de los recursos hídricos sostenible.

De acuerdo con la IHA (International Hydropower Association), hay nueve aspectos esenciales que hay que tener en cuenta para poder llevar a cabo un aprovechamiento del potencial hidroeléctrico de manera sostenible en materia medioambiental:

### 1. Calidad del agua

Es el primer aspecto a tener en cuenta a la hora de construir un aprovechamiento hidráulico ya que el estancamiento del agua puede alterar la calidad del agua desde el lugar del embalse hasta la desembocadura del río. Las principales afecciones en el agua son la reducción del oxígeno en agua, cambios en la temperatura y estratificación de los sedimentos.

### Soluciones:

Las principales soluciones dependen de la correcta identificación previa de los problemas que puedan surgir posteriormente, así como de la puesta en marcha de sistemas de prevención, tales como: salidas de agua a diferentes niveles, mecanismos de inyección de aire y sistemas para evitar la estratificación. Además, la IHA recomienda encarecidamente trabajar de manera conjunta con comunidades y autoridades locales.



## 2. Erosión y transporte de sedimentos

La creación de un embalse provoca cambios en el transporte de los sedimentos del río, ya que la sedimentación se produce de manera más acusada en el agua embalsada. Debido a esto, el curso del río, se ve privado de parte de la materia en suspensión que arrastra la corriente. A largo plazo, este fenómeno puede derivar en cambios geomorfológicos, asociados con el proceso de erosión.

### Soluciones

Una medida correctiva puede ser la inyección de sedimentos en la corriente. Sin embargo, es más recomendable y tiene más beneficios realizar actividades de reforestación sobre la riveras de los ríos. Estas medidas evitan la erosión y mitigan los efectos de la escasez de sedimentos.

## 3. Hidrología y flujos medioambientales del río

De manera general, las represas provocan cambios en la hidrología y el entorno del río, afectando de manera global a la biodiversidad. Este hecho no afecta sólo a la fauna, sino que también afecta a las actividades humanas que se desarrollan en el río.

### Soluciones

Las operaciones de la central deben incluir en todo momento aportaciones de agua al curso del río (caudal ecológico) para mitigar el impacto global sobre la cuenca. Estas aportaciones deben ser calculadas teniendo en cuenta cada uno de los problemas que se pretenden evitar.



#### 4. Especies endémicas y en peligro de extinción

La construcción de una presa puede poner en serio riesgo a especies amenazadas o únicas, debido a los cambios del hábitat natural, ya sea durante los trabajos de construcción o debido al estancamiento del agua. Río abajo, como ya se ha comentado, también se producen alteraciones que pueden provocar daños. Además, pueden producirse mezclas bruscas de especies en caso de que se lleven a cabo trasvases entre diferentes cuencas, alterando el equilibrio de la fauna.

#### Soluciones

Más que en ningún otro caso, los riegos sobre especies amenazadas deben ser estudiados y planificados antes de la construcción. Las soluciones más habituales pasan por la rehabilitación del hábitat y la creación de zonas de reserva especialmente protegidas.

#### 5. Paso de especies

Muchas especies recorren el río a lo largo de su ciclo de vida en uno o ambos sentidos. En muchos lugares, la migración de peces (como el salmón) es un acontecimiento anual, que se ve seriamente dificultado por las presas. Esta migración resulta de importancia vital para mantener las poblaciones de varias especies, y suponen, a menudo, suculentos recursos económicos para las poblaciones locales.

#### Soluciones

El paso de las especies debe ser estudiado antes de la construcción de la presa, para determinar su localización de manera que afecte en la menor medida posible a especies migratorias. Además, existen mecanismos para ayudar a esta fauna a superar los obstáculos de una presa: "escaleras" para peces, elevadores mecánicos, dispositivos de guía y programas de transporte de fauna. La migración a gran escala de algunas especies exige medidas complementarias para evitar la mortandad.



## 6. Plagas animales y vegetales en los embalses

En algunos casos, los embalses, a largo plazo, provocan problemas medioambientales debido a la introducción de especies exóticas no adaptadas al hábitat. Los cambios en las condiciones del agua pueden facilitar la colonización de especies ajenas al entorno, creando plagas. Estos cambios pueden afectar incluso a la generación de electricidad (cegando conducciones, por ejemplo) y al uso del agua corriente abajo, debido a la alteración de la calidad.

### Soluciones

La solución más eficaz para evitar plagas es reducir al máximo el tiempo que permanece estancada el agua, aunque eso no sea siempre posible.

## 7. Aspectos sanitarios

Los cambios producidos en el entorno por la construcción de presas pueden afectar a la salud pública, influyendo en la transmisión de enfermedades o el consumo de alimentos contaminados (por ejemplo, pescado con altos niveles de mercurio).

### Soluciones

Los planes de salud pública deben ser consensuados con las autoridades locales, y deben incluir actividades de seguimiento de los niveles de contaminación del río. No obstante, también existen beneficios para la salud: en áreas afectadas por la malaria, una adecuada gestión del caudal del río puede reducir las fuentes de la enfermedad.

## 8. Actividades de construcción

Las actividades de construcción provocan alteraciones en el medio acuático y terrestre. Además, y cuando la construcción se realiza cerca de asentamientos de población, se deberá tener en cuenta la contaminación acústica y los problemas derivados de la generación de polvo.



## Soluciones

Deben especificarse planes para gestionar todos los riesgos derivados de la construcción, rehabilitando las zonas de excavación y gestionando el almacenamiento y manipulación de materiales químicos.

### 9. Sistemas de gestión medioambiental

Es muy recomendable que cada actuación hidroeléctrica incorpore un sistema de auditoría medioambiental específicamente diseñado y adaptado a su entorno.

## Soluciones

Un sistema de gestión ambiental debería permitir la gestión integral y efectiva de todas las actividades de la central, desde su construcción hasta el final de su vida útil. Los programas de control integrados en el sistema deberán asegurar la continua mejora de la gestión medioambiental a lo largo de todo el proyecto.

Como se ha visto en estos nueve factores esenciales para un aprovechamiento sostenible del agua la mayoría de los problemas pueden preverse, minimizarse y hasta incluso evitarse con un correcto estudio del impacto medio ambiental previo a la construcción de la infraestructura. De esta manera se podrá saber qué medidas se deben llevar a cabo para que la construcción de la presa no cause excesivos impactos medioambientales.

### Otros aspectos sobre la sostenibilidad: criterios sociales

Los proyectos hidroeléctricos tienen impactos positivos en la sociedad, ya que contribuyen a aumentar la riqueza de las comunidades locales no solo con las actividades derivadas de la construcción y el mantenimiento de las instalaciones, sino con el hecho de que proporcionan electricidad al entorno más cercano. Además, la construcción de



presas ayuda a reducir los riesgos de riadas, y aseguran el suministro constante de agua fresca de calidad, si se gestiona adecuadamente.

No obstante, existen importantes impactos negativos asociados a las grandes centrales. Además de la alteración del entorno natural, que será tanto más importante cuanto mayor sea la dependencia de la población humana de dicho entorno, existen problemas de carácter exclusivamente social como son:

La pérdida física de terrenos y propiedades inmobiliarias, que a veces afectan a la totalidad de un núcleo de población.

Transición a otros medios de supervivencia, especialmente en las comunidades más arraigadas al entorno

Pérdida de identidad cultural de la población y ruptura con su tradición, provocada por posibles traslados de gente al construir la infraestructura de la presa.

Estos impactos, que son a menudo difíciles de gestionar, deben minimizarse con políticas de redistribución de los beneficios entre la comunidad afectada, y con actuaciones complementarias dependientes de las autoridades locales. No hay que olvidar que, especialmente en los países en vías de desarrollo, las centrales hidroeléctricas mejoran sustancialmente las condiciones sanitarias del entorno, estimulan el crecimiento económico e incrementan, en general, la calidad de vida.



## 12. Conclusiones y actuaciones propuestas:

La energía hidroeléctrica es, tras muchos años de experiencia, una tecnología renovable de altísima eficiencia y las previsiones energéticas del futuro auguran un devenir muy halagüeño a esta forma de generación.

En España el potencial hídrico aún por explotar es enorme, y se estima que se pueden aprovechar hasta 65000 GWh anuales en condiciones de sostenibilidad, casi un 50% más de lo que se está aprovechando actualmente.

Tras las simulaciones realizadas en este proyecto, donde se analizan distintas hipótesis acerca del diferente aprovechamiento hídrico posible en España, hay que concluir que una mayor contribución de la generación hidroeléctrica en el mix energético español traería beneficios sociales y aumentaría la sostenibilidad y robustez del sistema eléctrico nacional.

Bien es cierto, como se ha comprobado en las primeras simulaciones, que pequeñas variaciones en la potencia hidráulica instalada no traen consigo cambios considerables. Sin embargo, en la hipótesis de máximo aprovechamiento hidráulico, se ha demostrado que si la producción hidroeléctrica anual fuese de unos 60000 GWh anuales los beneficios serían muy llamativos: las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuirían hasta un 10%, con las consiguientes ventajas que esto traería para el medio ambiente y la población; la dependencia energética relativa a la producción de energía bajaría hasta un 6%, haciendo que España fuera menos dependiente de terceros países; el precio sombra de la electricidad, que es el precio que tendría ese bien en condiciones de competencia perfecta, disminuiría alcanzando los 120 €/MWh, 8 euros por debajo del precio actual. Un bajada que podría llegar a repercutir directamente en los usuarios disminuyendo el precio de sus facturas.

Se han realizado más simulaciones tratando de buscar un sistema eléctrico más sostenible probando otros mixes energéticos, pero ha resultado imposible obtener unos mejores resultados que los obtenidos con el máximo aprovechamiento hidráulico, lo que indica que el desarrollo y aportación futura de la energía hidroeléctrica debe ser importante para llevar a España a un camino de sostenibilidad y eficiencia energética.

La hidráulica de bombeo es a día de hoy la única forma de almacenamiento de grandes cantidades de energía, permitiendo así la integración en el sistema eléctrico de las



fuentes renovables no regulables, como por ejemplo la energía eólica. Su capacidad para aplanar la curva de la demanda también contribuye de manera eficaz a aumentar la eficiencia y robustez del sistema eléctrico español. Es por ello que el IDAE estima que la potencia instalada de centrales hidráulicas de bombeo en España en los próximos 5 años triplique la que hay instalada en la actualidad.

En este proyecto se ha analizado en profundidad diversos aspectos de la energía hidráulica desde el punto de vista del sistema y el mercado eléctrico, pero es innegable que el desarrollo hidráulico trae consigo muchas ventajas de índole social y de vital importancia para la vida humana como son la regulación del caudal de los ríos, el control de las riadas, el uso de agua para regadíos y el suministro de agua potable.

En cuanto a los impactos medioambientales que la infraestructura necesaria para el aprovechamiento hidráulico provoca, hay que decir que estos impactos son a menudo difíciles de gestionar, pero sí que pueden preverse, minimizarse, evitarse o incluso compensarse con un correcto estudio del impacto medioambiental previo al comienzo de la obra. Sería interesante la creación de políticas de redistribución de los beneficios si hay comunidades afectadas. No hay que olvidar que las centrales hidroeléctricas mejoran considerablemente las condiciones sanitarias del entorno, estimulan el crecimiento económico y por lo general, aumentan la calidad de vida.

Por último, cabe destacar que las simulaciones de este proyecto se han realizado con un complejo modelo matemático, por lo que hay que tener sumo cuidado a la hora de interpretar los resultados obtenidos, ya que como todo modelo de simulación, no es perfecto y los resultados obtenidos, aunque fiables, tampoco son perfectos.

Por todo lo antes mencionado en este apartado y en el contenido de este proyecto, se puede concluir que España cuenta con potencial hídrico aún explotable en condiciones de sostenibilidad, y que la explotación de estos recursos pueden traer numerosos beneficios al sistema eléctrico español y a la economía del país.

Para que España continúe a la vanguardia de los sistemas energéticos sostenibles, deberá dar más peso a la energía hidráulica en su mix energético y usar el bombeo en su sistema eléctrico como una herramienta esencial para mejorar la eficiencia energética global.



### 13. **Bibliografía:**

- [www.ree.es](http://www.ree.es) (avance del sistema electrico 2015)
- [www.idae.es](http://www.idae.es) (Plan de energías renovables 2011-2020)
- [www.nucleonor.org](http://www.nucleonor.org)
- [http://www.comillas.edu/Documentos/BP/sankey\\_energy.html](http://www.comillas.edu/Documentos/BP/sankey_energy.html)
- [www.hispagua.cedex.es](http://www.hispagua.cedex.es)
- <http://www.wwf.es>
- <http://www.unesa.es>
- <http://www.ecointeligencia.com>
- <http://www.allpe.com>
- Observatorio de energía y sostenibilidad en España. Edición 2015. Catedra BP
- Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Libro digital del agua.
- European environment agency. Reservoir and dams
- D. Alvaro López Peña. Evaluation and design of sustainable energy policies.
- Ministerio de industria, turismo y comercio. Guía de mini centrales