Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis la de viabilidad de un aprovechamiento hidroeléctrico reversible N.Pallaresa-N.Ribagorzana

TRABAJO FINAL DE GRADO

Trabajo realizado por:

Adrià Asensio Carmona

Dirigido por:

Josep Dolz Ripolles

Grado en:

Ingeniería Civil

Barcelona, 20-06-2014

Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental

Índice

Pág

1-Introducción.....3

1.1- Objetivos y planificación.....3

1.2- Introducción al sector eléctrico español.....3

1.3- Generación de energía eléctrica.....4

1.4- Irregularidad de la energía eólica.....6

1.5- ¿Qué es un aprovechamiento hidroeléctrico reversible?... 8

2-**Estudio de energía**.....10

2.1- Dependencia energética de España.....10

2.2- Consumo de energía primaria en España.....11

2.3- Producción de energía eléctrica en España.....13

2.3.1- Evolución de la producción.....13
2.3.2- Situación actual.....14
2.3.3- Situación futura.....15

2.4- Centrales eléctricas Españolas.....16

2.5- Producción de energía eléctrica en Cataluña.....18

2.5.1- Evolución de la producción.....19
2.5.2- Situación actual.....22

3-**Estudio del terreno**.....24

3.1- Demanda de agua en la cuenca del Segre.....25

3.2- Características de los embalses.....26

3.2.1- Noguera Ribagorzana.....26
3.2.2- Noguera Pallaresa.....29

3.3- Topografía del terreno.....32

3.3.1- Planteamiento y selección de alternativas.....33

4- Solución propuesta.....37

4.1- Situación del embalse superior.....37

4.2- Fases constructivas del proyecto 40

5- Conclusiones.....42

6- Bibliografía consultada.....45

1-Introducción

1.1- Objetivos y planificación

El objetivo principal del trabajo es hacer un estudio de viabilidad para la construcción de una central hidroeléctrica de bombeo en la zona noroeste de Cataluña que permita solucionar los problemas en la generación de energía eléctrica y en la demanda de agua. Más concretamente se situará entre dos ríos, el Noguera Ribagorzana y el Noguera Pallaresa, ambos afluentes del río Segre. El curso del primero discurre bordeando la frontera catalano-aragonesa y el segundo unos kilómetros más al este de forma casi paralela al anterior, ambos, separados por un terreno con cotas considerablemente elevadas.

El principal problema de la situación actual es que el Noguera Ribagorzana tiene muchos embalses pero el caudal no es muy elevado, en cambio el Noguera Pallaresa tiene un caudal abundante pero la capacidad de sus embalses es reducida. Se necesita establecer una mayor regulación en estas dos cuencas para poder aprovechar los recursos naturales con tal de generar energía eléctrica.

La solución que se propone en este trabajo es la construcción de una central hidroeléctrica de bombeo que conecte los dos ríos, para poder sacar provecho del desnivel que los separa y su situación geográfica. De esta manera se podría bombear agua desde el Noguera Pallaresa a un depósito situado en la cima del desnivel durante las horas valle de demanda de energía eléctrica, cuando ésta sobra, para luego turbinarla a una central en el Noguera Ribagorzana durante las horas punta de demanda de energía, teniendo la posibilidad también de realizar el trasvase en sentido inverso si la demanda de agua así lo requiere. Dicha solución evitaría en parte uno de los mayores problemas de la energía eléctrica, es decir, el hecho de que no se puede almacenar, por lo tanto necesitamos que la producción se adapte a la demanda de cada momento. Al ser la electricidad un bien que no puede almacenarse tenemos que ser conscientes de que cada vez que se enciende un interruptor estamos poniendo en marcha una central.

Para realizar este trabajo se hará un estudio previo de la producción y el consumo de energía eléctrica en nuestro país y en Cataluña, comparándolos entre si para ver que fuentes de energía son las más utilizadas para generar energía eléctrica, con el objetivo de saber la importancia que tiene el sector hidroeléctrico en la producción.

Posteriormente se procederá al estudio del terreno para saber cual sería la mejor situación geográfica para sacarle más partido a dicho aprovechamiento reversible, y el estudio de los ríos en cuestión.

También se observarán las características de las demás centrales reversibles de Cataluña para tener una idea de su producción y poder tener unos parámetros de referencia para el posterior diseño de nuestro aprovechamiento reversible.

Para acabar se intentará dimensionar, sin entrar en detalle las características que debería tener la obra civil, como por ejemplo el diámetro de cañería necesario, el tamaño del embalse superior o el caudal de agua con el que podremos operar.

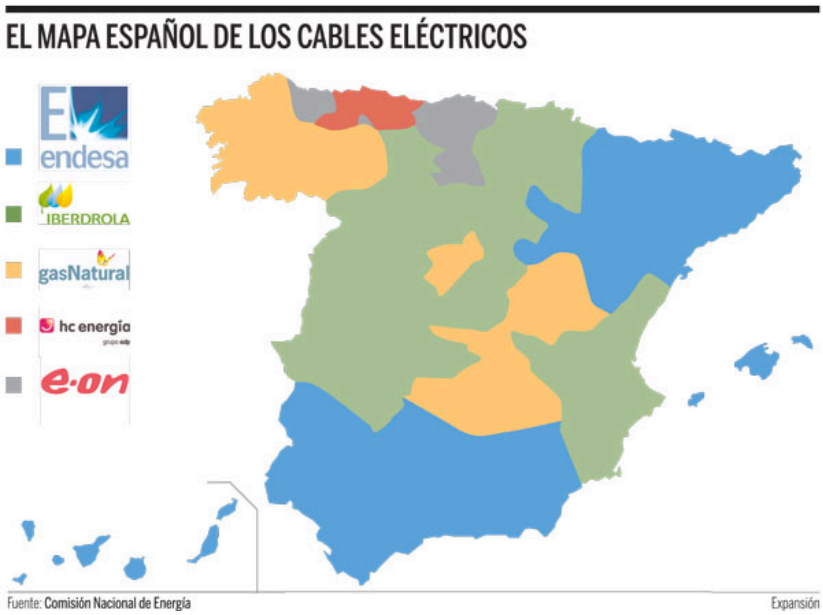
1.2- Introducción al sector eléctrico español

La columna vertebral del Sector son las compañías eléctricas que representan una parte muy importante de la industria española. Como cualquier empresa, además de operar

sus instalaciones, también se encargan de obtener los recursos financieros para su actividad. Estas compañías son también, un importante motor de empleo. Según datos del ministerio, en España generan más de 50.000 empleos directos y del orden de los 400.000 indirectos. Es el sector empresarial que más clientes tiene en todo el país y es que todos nos beneficiamos de la energía eléctrica.

El sector eléctrico se completa con los organismos reguladores específicos del sector: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio; Comisión Nacional de la Energía (CNE); y los Operadores de Mercado del Sistema (Endesa, Iberdrola y Gas Natural Fenosa son los más representativos). El primer organismo nombrado gestiona el mercado mayorista de electricidad al que todas las empresas generadoras están obligadas a ofertar su producción y el segundo realiza la coordinación técnica para asegurar que producción y demanda coinciden en todo momento.

Existe un único transportista en todo el Estado, que es Red Eléctrica de España. Los 5 operadores más importantes del país han sido formados después de varias fusiones de empresas más pequeñas, ya que inicialmente las empresas eléctricas tenían un carácter local debido a la dificultad de transportar energía a largas distancias. Estos 5 operadores se reparten el 98% de la instalación de la siguiente forma:



Figura(1): Distribución de operadores en España. Fuente: Comisión Nacional de Energía.

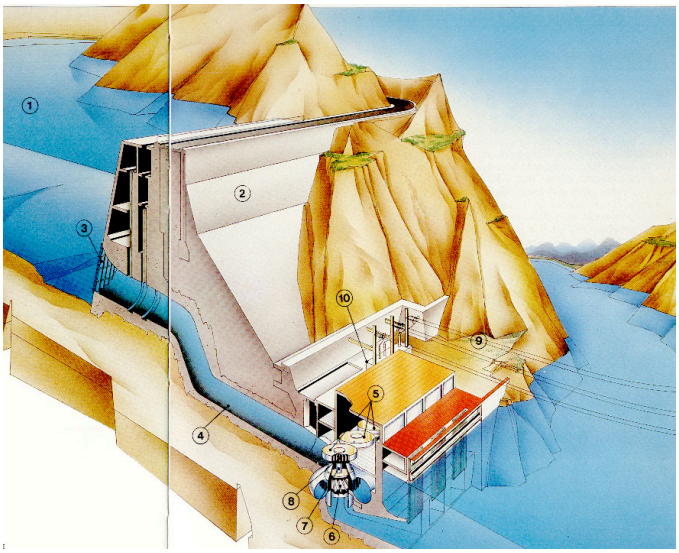
1.3- Generación de energía eléctrica

Para generar electricidad las diferentes centrales eléctricas convierten una energía primaria en electricidad, dicha conversión se suele producir con un generador eléctrico o alternador, que es el encargado de transformar la energía mecánica de rotación, producida por la energía primaria en cuestión, en electricidad.

Los principales tipos de centrales eléctricas y su funcionamiento son:

- Las centrales hidroeléctricas, permiten aprovechar la conversión de la energía potencial del agua en energía cinética, que a su vez se transformará en energía mecánica de rotación al llegar a la sala de máquinas de la central. Esta energía mueve las turbinas hidráulicas que están acopladas a generadores eléctricos. Una vez que ha cedido su

energía, el agua es restituida al río, aguas abajo de la central, a través del canal de desagüe.



Embalse (1), presa (2), rejilla metálica (3), tubería forzada (4), conjunto turbina-alternador (5), turbina hidráulica (6), eje (7), generador eléctrico (8), transformadores (9), líneas de transporte (10).

Figura(2): Esquema central hidroeléctrica. Fuente: UNESA.

- En las centrales térmicas convencionales, los combustibles fósiles (carbón, gas...) son quemados en una caldera generando una energía calorífica que evapora el agua. Este vapor de agua a alta presión acciona las palas de una turbina de vapor, convirtiendo la energía calorífica en energía mecánica, la cual da lugar, a continuación, a la generación de energía eléctrica.

- En una central de biomasa o de residuos sólidos urbanos (RSU), el esquema de generación de electricidad es el mismo que en las centrales térmicas, y sólo difieren los combustibles utilizados.

- Centrales térmicas de ciclo combinado, donde emplean una tecnología que permite un mejor aprovechamiento de la energía primaria que en los ciclos térmicos convencionales, ya que utilizan dos ciclos termodinámicos. Un primer ciclo Brayton, para la combustión del gas natural en una turbina de gas y un segundo ciclo de vapor (convencional).

- En las centrales nucleares, es la fisión de átomos de uranio la que se encarga de provocar la liberación de una gran cantidad de energía. Esta energía calienta el fluido que circula por una serie de tubos, convirtiéndolo en un vapor que, a su vez, acciona un grupo turbina vapor-alternador para producir electricidad.

- En una central eólica, la energía cinética del viento se transforma directamente en energía mecánica rotatoria mediante un aerogenerador.

- En las centrales solares térmicas, es la energía del sol quien calienta un fluido que, convirtiéndolo en vapor, sigue el ciclo de conversión previamente explicado tanto en la centrales térmicas como en las de biomasa.

- En las centrales solares fotovoltaicas el elemento básico es el conjunto de células fotovoltaicas, que captan la energía solar transformándola en corriente eléctrica continua mediante el efecto fotoeléctrico. Posteriormente la corriente continua generada será transformada en corriente alterna mediante un inversor para poder circular por la red de transporte.

Los modos de energía anteriormente descritos son los que constituyen la mayor parte de la producción en nuestro país, tanto los que utilizan recursos renovables como los que no lo hacen.

La producción de energía eléctrica puede dividirse en dos grandes categorías que engloban las diferentes fuentes de energía utilizadas. Por un lado, tenemos el régimen ordinario, que engloba a la energía nuclear, la energía térmica, las centrales de ciclo combinado y la energía hidráulica. En el otro lado tenemos el régimen especial, que son principalmente las energías renovables (eólica, solar fotovoltaica, termosolar, geotérmica, minihidráulica, biomasa, etc.) y la cogeneración. Para este tipo de régimen existe un sistema de incentivos temporales para aquellas instalaciones que lo utilizan de manera considerable. El objetivo de estos incentivos, que se ampliaron en el *Plan de Energías Renovables 2005-2010,* era potenciar las energías renovables para alcanzar en el estado español una producción equivalente al 12,1% de la demanda energética global en el año 2010. El *Plan de Energías Renovables 2011-2020* va más lejos, pretende conseguir hasta un 22,7% de la energía global, un 42,3% si nos referimos únicamente a la producción de energía eléctrica.

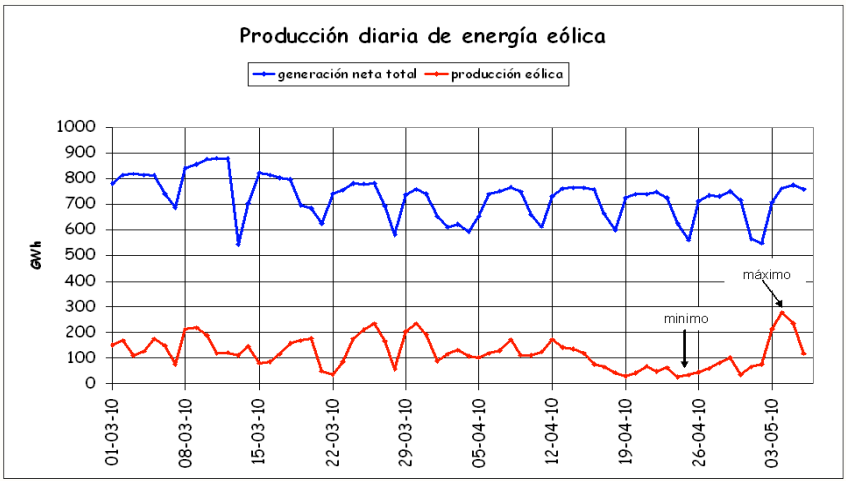
Se tiene que buscar un equilibrio en el mix eléctrico del país ya que no es posible cubrir toda la demanda con una sola fuente de energía y mucho menos si ésta es renovable, que aunque hoy en día hayan evolucionado mucho, tendrán que pasar varios años para ser la principal fuente de generación de energía eléctrica.

1.4- Irregularidad de la energía eólica

La energía eólica es la que está sufriendo en España un desarrollo más importante en los últimos años en cuanto a incremento de potencia instalada y generación de energía. Cada vez es mayor su participación en el mix eléctrico.

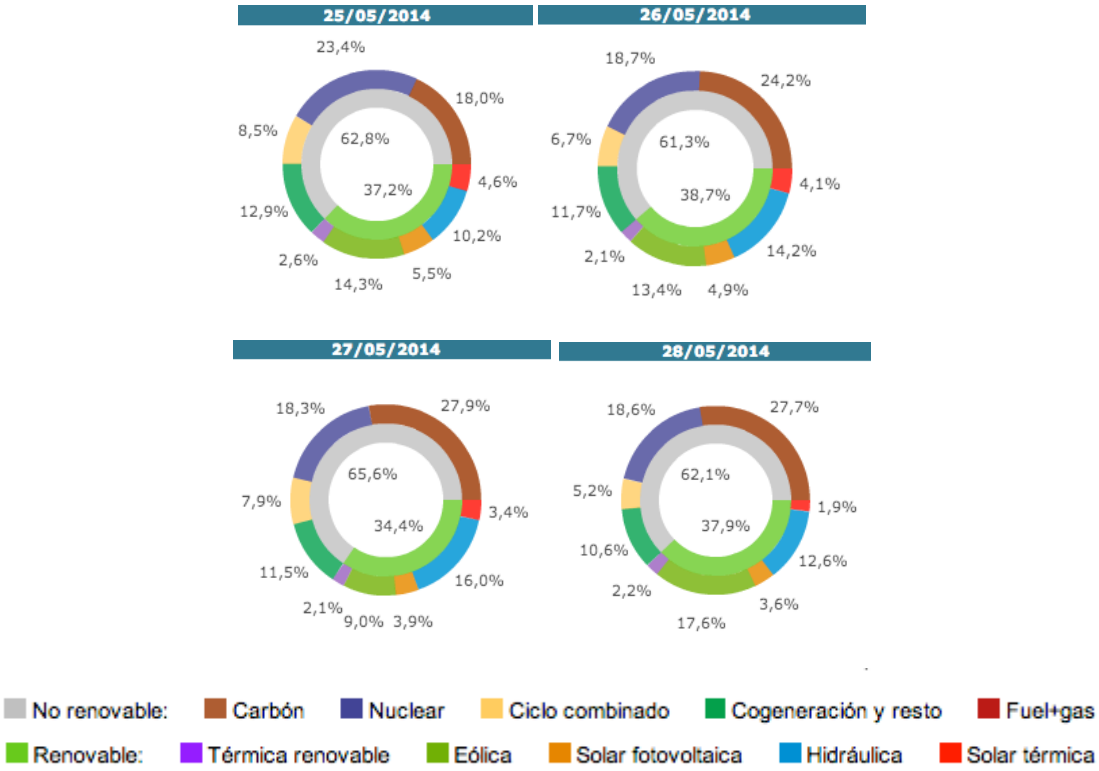
El problema de esta fuente de energía es que nosotros, hasta el momento, no podemos controlar su nivel de producción ya que depende del viento en cada instante. Además, tanto la falta como el exceso de viento generan problemas en el funcionamiento de las centrales eólicas. Por otro lado, los picos de producción pueden ocurrir en las horas valle de la demanda, cuando la energía no es necesaria y no la podemos aprovechar. No hace falta esperar varios meses para que esta irregularidad sea notable, ésta se produce de un día para otro e incluso en un mismo día los niveles de producción pueden fluctuar considerablemente.

Para dejar constancia de dicha irregularidad observamos los datos de producción durante unos días. En la Figura(3) se muestra la producción día a día de esta energía durante dos meses. Como vemos el gráfico presenta numerosos altibajos en ocasiones de un día para otro haciendo que esta fuente de energía sea imprevisible y dificultando que se convierta en el sustento energético del país.



Figura(3): Producción de energía eólica de Marzo a Mayo de 2010. Fuente: Artículo "*Las "ventajas" de la energía eólica*" S.Sanchez Rabat.

En la Figura(4) se presentan los datos obtenidos de la Red Eléctrica de España. Podemos observar la aportación diaria de las diferentes fuentes de energía, vemos como la energía eólica, en tan solo 4 días, puede mantener un nivel estable de producción como sucedió el 25 y 26 de Mayo o puede llegar a doblarse como ocurre los día 27 y 28, de la misma manera que dicha producción se podría ver reducida a la mitad. Si nos fijamos en la evolución de las demás fuentes vemos que todas se mantienen constantes excepto la energía hidroeléctrica que aumenta su aportación cuando la eólica disminuye (día 26 de Mayo) y la reduce cuando la eólica aumenta, y es que ésta es precisamente, debido a sus características, la encargada de mitigar las fluctuaciones de las energías más irregulares, como son principalmente la eólica y en un segundo plano la energía solar.



Figura(4): Mix eléctrico últimos días de Mayo 2014. Fuente: Red eléctrica de España (REE).

La solución al problema de la energía eólica pasa por la construcción de las centrales hidroeléctricas de bombeo, ya que es la única manera de poder almacenar la energía producida por las centrales eólicas cuando ésta no se necesita y poder utilizarla en los picos de demanda. Con todo ello, conseguimos disminuir los efectos de la irregularidad de la fuente eólica. Combinando de forma eficaz el funcionamiento de estos dos tipos de centrales podemos llegar a conseguir una estabilidad energética suficiente para que estas fuentes renovables se conviertan en las principales aportaciones de energía para el país, logrando disminuir la importancia de aquellas fuentes no renovables que tienen menor aceptación social y contaminan más el medio ambiente.

1.5- ¿Qué es un aprovechamiento hidroeléctrico reversible?

Un aprovechamiento hidroeléctrico reversible, también llamado Central hidroeléctrica de bombeo, tiene el cometido de almacenar agua en una cota elevada durante las horas valle para poder generar energía durante las horas punta de demanda.

La demanda de electricidad de una determinada red varía significativamente durante el día y según la época del año, provocando un irregular funcionamiento del sistema eléctrico. Para resolver dicho problema, las compañías eléctricas modifican la curva de demanda diaria introduciendo un consumo artificial durante las horas valle utilizando las centrales hidroeléctricas de bombeo. De esta forma conseguimos almacenar la energía cuando sobra y podemos devolverla a la red cuando es requerida.

Hay dos tipos de centrales hidroeléctricas de bombeo: las puras y las mixtas. Por un lado, en las puras el embalse superior no recibe más aportaciones de agua que las que proceden del bombeo del embalse inferior. Normalmente en este caso el embalse superior suele ser un lago artificial y el balance energético suele ser negativo, es decir, la central consume más energía en bombear agua que la que se obtiene al turbinarla.

Por otro lado, en las centrales mixtas, el embalse superior recibe otras aportaciones de agua por medios naturales. En estos casos la energía generada por la turbinas suele ser mayor que la consumida por las bombas, lo que resulta en un balance energético positivo.

A simple vista no parece muy buena solución ya que mayormente estamos consumiendo más energía que la que obtenemos, pero el precio de la energía consumida es mucho menor que cuando estas centrales producen energía y la entregan a la red, lo que provoca ventajas de tipo económico y técnico que son las que realmente explican la construcción de este tipo de centrales. Un ejemplo de ello es que tienen un tiempo de arranque muy corto y una buena regulación, lo que las hace ideales para cubrir puntas de consumo, hacer frente a una desconexión no programada de una gran unidad de producción como podría ser un grupo nuclear o compensar rápidamente la irregularidad de la producción eólica. Otra ventaja es que ayudan a nivelar la curva de carga diaria lo que a su vez regulariza el funcionamiento de los demás tipos de centrales, como por ejemplo las nucleares o térmicas haciéndolas más rentables, ya que su funcionamiento óptimo se produce a potencia constante.

En Cataluña existen dos aprovechamientos hidroeléctricos reversibles que son, el situado en los embalses de estanque Gento-Sallente y la de Moralets-Llauret. La central de Gento-Sallente fue la primera central de bombeo puro en construirse en tierras catalanas. Ambos embalses son de características similares, tienen un volumen de $3hm^3$ y $5hm^3$ respectivamente y aunque se ha proyectado un aumento del Estanque Gento

dotando de 8 metros más de altura a la presa, este todavía no se ha llevado a cabo. La posición de los embalses nos permiten alcanzar un desnivel de 400m y la central cuenta con una potencia de 450MW.

La central de Moralets-Llauret está situada en la cabecera del río Noguera Ribagorzana. Los embalses están separados entre si 5Km con una diferencia de altura de 800m. La central de Moralets consta de tres grupos de turbina-bomba, alternador-motor y tiene una potencia total de 220MW pero existe un proyecto para aumentar dicha potencia hasta alcanzar los 400MW. Esta central es capaz de bombear un caudal de 9,21 m^3/s y logra alcanzar una producción media anual de 279Gwh por los 357Gwh que consume al bombear agua. Aunque este balance sea negativo ya se ha dicho con anterioridad que, las condiciones económicas en las que se obtienen la producción y el bombeo justifican su funcionamiento.

Por último, tan solo nombrar uno de los proyectos más ambiciosos que se están llevando a cabo en este ámbito, la instalación de una central hidroeléctrica de bombeo en los embalses de Mequinenza-Ribarroja, situados entre Aragón y Cataluña con un desnivel de 350m entre si. Está previsto que sea de dimensiones considerablemente mayores a los otros dos casos anteriormente descritos, pues se pretende diseñar para un caudal de bombeo de 16 hm^3 al día, dotando a la central con una potencia de 1100 MW.

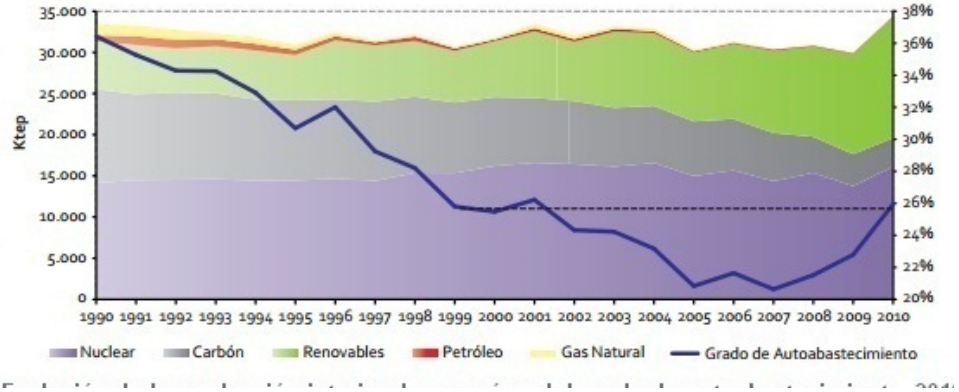
2- Estudio de Energía

En este apartado se analiza el consumo y la generación de energía en nuestro país, observando en primer lugar la dependencia energética que existe en España en relación con los otros países de la UE. A continuación estudiaremos el consumo y generación tanto de energía primaria como de energía eléctrica. Finalmente se comparará la situación con la existente en Cataluña.

2.1- Dependencia energética de España

Precisamente uno de los elementos que ha limitado el desarrollo económico de España es la pobreza de recursos energéticos, en concreto la carencia de hidrocarburos líquidos y gaseosos y la mala calidad del carbón existente. La escasez de recursos ha condenado tradicionalmente al sistema energético nacional a una situación de déficit y dependencia exterior. El grado de autoabastecimiento según los dotas del PANER 2011-2020 se sitúa en la última década entre el 20 y el 25%, en 2010 fue del 26,1%.

España es un país con limitados recursos energéticos, por lo que nuestro sistema energético se ha caracterizado siempre por tener una dependencia exterior elevada y que ha ido aumentando en los últimos años. Así, las importaciones de energía han pasado de representar el 61% en el año 1985 al 76% en 1999. Una forma de cuantificar esta dependencia es a través de un indicador que mide la relación entre la producción nacional de una energía determinada y el consumo de la misma (grado de autoabastecimiento).



Figura(5): Evolución del autoabastecimiento energético. Fuente: *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2011-2020.*

En la Figura(5), puede verse la evolución para España de la producción nacional y el grado de autoabastecimiento, durante el periodo 1990-2010. En sólo veinte años, el autoabastecimiento energético español se ha reducido casi a la mitad. En 1986 España producía el 37% de sus necesidades energéticas, mientras que en 2005 el autoabastecimiento cayó hasta un valor cercano al 20%, entre otros motivos porque también se ha disparado el consumo industrial, doméstico y de transportes (en 1980 teníamos menos de siete millones de coches y actualmente casi el triple). Esta dependencia exterior supone, por ejemplo, que España debe importar anualmente más de 60 millones de toneladas de petróleo, lo cual representa el pago de una importante factura energética.

Aunque el autoabastecimiento ha crecido en los últimos años gracias a las energías

renovables, España sigue importando prácticamente el 80% de la energía que consume, lo que según la Eurostat, la oficina estadística comunitaria, nos convierte en el séptimo país de la Unión Europea con mayor dependencia energética. Sólo Chipre, Malta, Luxemburgo, Irlanda, Italia y Portugal necesitan importar más productos energéticos que nosotros. La dependencia energética media de los veintisiete países de la UE es aproximadamente del 54 por ciento, lo que implica que España está casi 30 puntos por encima de la media. El único socio comunitario que exporta energía es Dinamarca.

No hay que olvidar que España ha ido reduciendo paulatinamente la producción de carbón, que cada vez es menos significativa, y la energía nuclear. En los últimos años, las llamadas energías alternativas (solar y eólica principalmente) han experimentado un fuerte incremento. Sin embargo, no alcanzan para cubrir los descensos en las consideradas "clásicas".

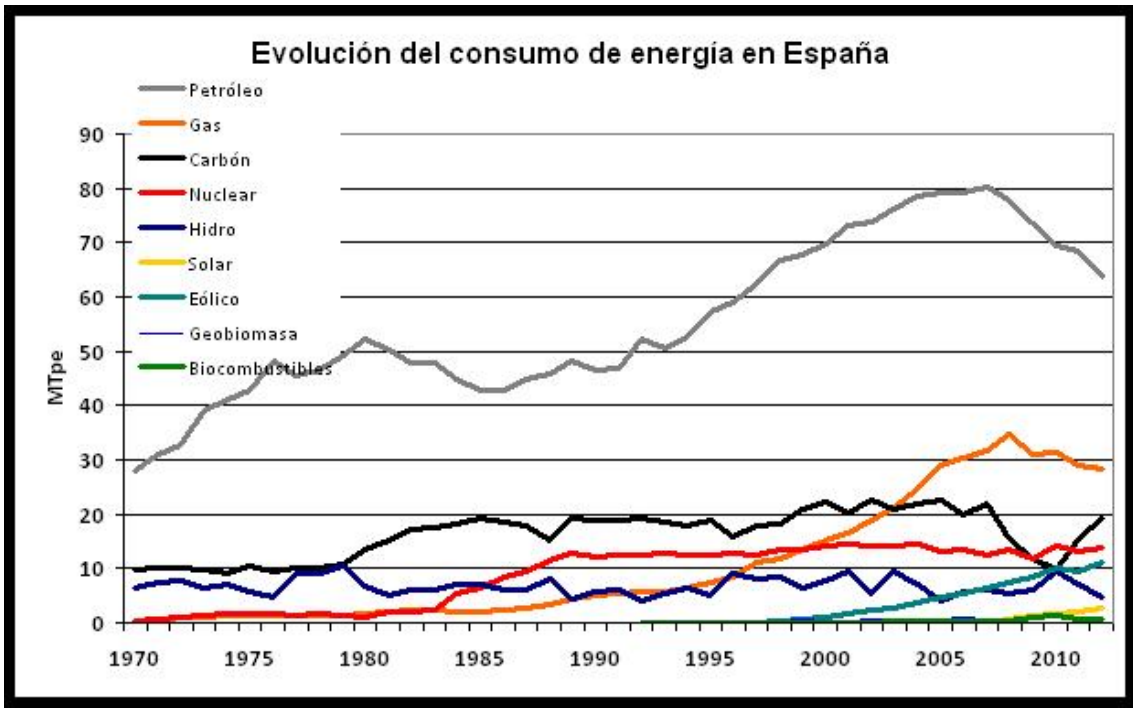
La electricidad es la tercera energía que más importaciones necesita. Como hemos visto anteriormente, el desarrollo de las energías alternativas no ha podido paliar ni la disminución de la producción de origen nuclear ni mucho menos el aumento del consumo. España necesita más electricidad de la que produce y nuestro principal, y prácticamente único suministrador es Francia. En junio de 2008, ambos países firmaron por fin un acuerdo para construir una línea de interconexión eléctrica transpirenaica. Esta nueva línea duplicará la capacidad de las actuales, incrementando las posibilidades de transporte en 1400MW. Se prevé que estará operativa en 2014. Puede decirse que aunque España tampoco es autosuficiente en el sector de la electricidad, al menos depende de un país estable y que desde hace bastantes años ha demostrado ser un aliado fiable.

2.2-Consumo de energía primaria en España

España es un país desarrollado, por lo que tiene un consumo de energía per cápita relativamente elevado. Aunque estamos por debajo de los países más industrializados del mundo (EE.UU., Japón, Canadá, Alemania, Francia, Reino Unido e Italia), nuestro indicador supera a los de la mayoría del resto de países. La evolución del consumo de energía primaria en España ha seguido, en general, la pauta de los países europeos de nuestro entorno. Tuvo incrementos fuertes antes de la crisis de los setenta, para después ralentizarse su aumento en los años ochenta. Asimismo, tuvo una clara trayectoria ascendente durante la segunda mitad de los años noventa, como consecuencia del crecimiento económico registrado en nuestro país. Dicha tendencia ascendente se mantuvo en la década de los 2000, hasta el inicio de la crisis económica, alrededor de 2009, donde tuvo lugar el inicio de una reducción en el consumo de energía debido a la mala situación que atraviesa el país y a la campaña de concienciación de ahorro de energía emitida por la diferentes administraciones.

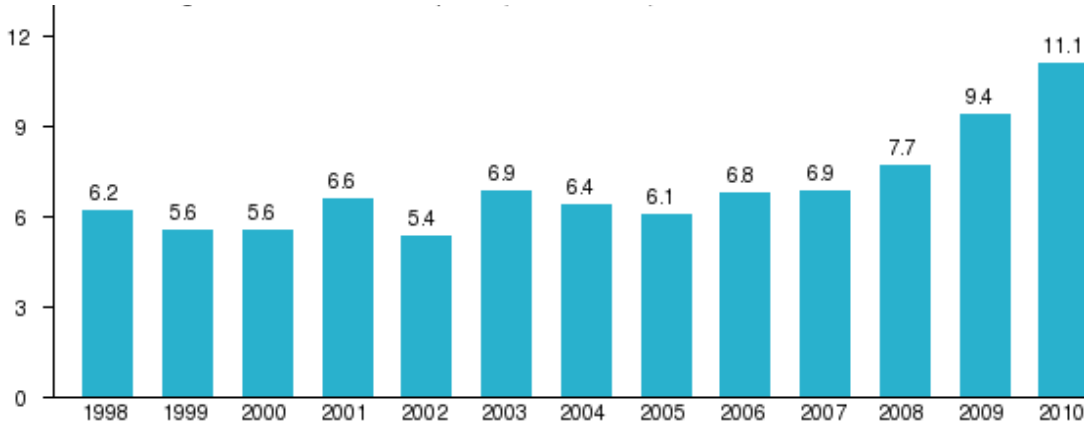
Como se muestra en la Figura(6) el papel del petróleo es fundamental en el sistema energético español, pues representa más de la mitad del consumo total. Teniendo en cuenta que la producción nacional de crudo es muy escasa, aquí está una de las causas del déficit energético de España. El carbón es, porcentualmente, la energía primaria cuyo consumo se ha visto más reducido en los últimos años. La energía nuclear figura en tercer lugar, con un consumo muy regular a lo largo de las últimas décadas, pero con tendencia a disminuir su participación en el total en los últimos años ya que desde hace tiempo no se plantea explotarla con más intensidad. La energía hidráulica, que en los años 60 llegó a satisfacer más del 20% de nuestras necesidades energéticas, quedó

relegada a un papel más secundario a lo largo de los años 90, pero en la última década se ha potenciado su uso, al igual que el de otras fuentes de carácter renovable como la eólica o la solar. El gas por su parte fue creciendo paulatinamente a partir de la década de los 80, hasta convertirse en una de las fuentes más utilizadas para la producción de energía desde los 90 hasta la actualidad.



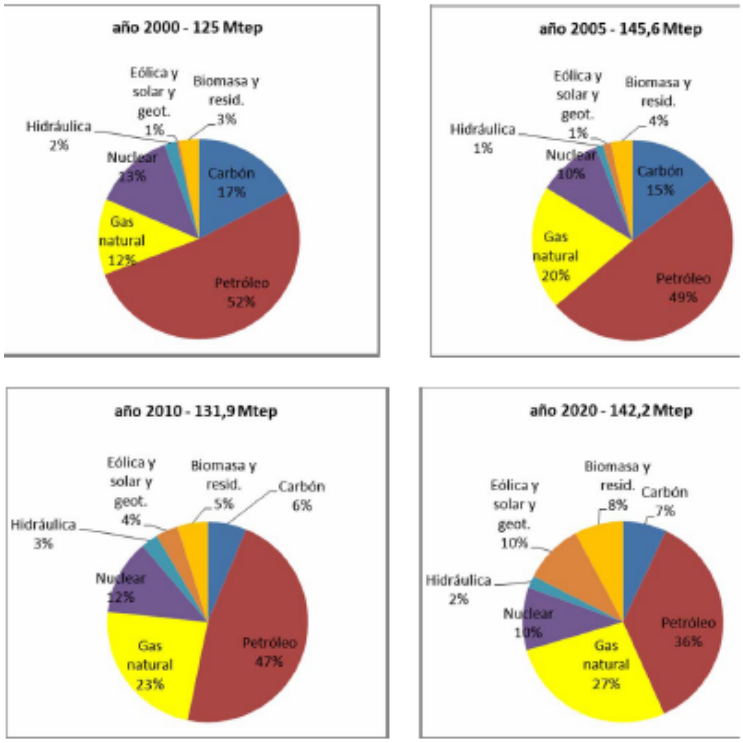
Figura(6): Evolución del consumo de energía primaria en España. Fuente: *BP Statistical Review of World Energy. 2013 con datos de 2012.*

Las energías renovables han ido incrementando su aportación al total de energía primaria, incrementando su porcentaje hasta un 11,1% en 2010, logrando así, doblar su participación en la última década y alcanzar los objetivos del Plan de energía planteado hasta 2010. Esto ha sido posible gracias a la evolución en las tecnologías de generación de estas energías y a las ayudas que ha dado el gobierno para aquellos que han intentado potenciarlas y hacer uso de ellas.



Figura(7): Cobertura de energía primaria por parte de las energías renovables. Fuente: Datos del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

En los balances energéticos de los últimos años aparecen varias energías renovables, pero su aportación es todavía pequeña respecto del total, exceptuando la energía eólica, que ha tenido un importante desarrollo recientemente, incluso siendo una energía en la cual no podemos escoger el momento en que queremos producir. En la Figura(8), con datos del *Plan de Energías Renovables 2011-2020* (PER 2011-2020), se puede apreciar el incremento en la aportación de las energías renovables y los objetivos que se marca el gobierno respecto a ellas, que en 2020 constituirán un 20% de la energía total si se logran cumplir, dando mucha importancia a la energía eólica y solar y disminuyendo cada vez más la aportación del petróleo y el carbón.



Figura(8): Distribución del consumo de energía primaria clasificado por fuentes. Fuente: Artículo "Las energías renovables cubrirán el 20,8% del consumo de energía en España en el año 2020", datos del PER 2011-2020.

2.3- Producción de energía eléctrica en España

2.3.1- Evolución de la producción

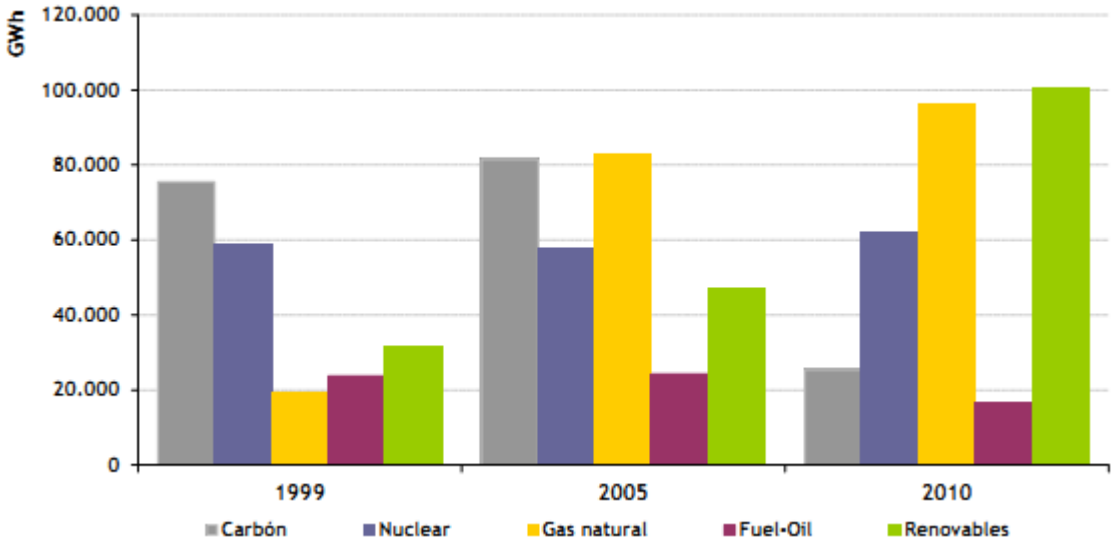
Nos centramos ahora en la evolución de la producción eléctrica, la cual está lógicamente muy relacionada con la evolución en el parque generador. Así, la producción de energía eléctrica en 1917 fue de 850 millones de kWh, y se triplicó en 1929. Por aquel entonces, la estructura de la producción de energía eléctrica era básicamente de origen termoeléctrico e hidroeléctrico. Tras la guerra civil española de 1936-39, y hasta la década de los cincuenta, la destrucción de algunas instalaciones eléctricas causada por el conflicto hizo que la producción de electricidad aumentara escasamente, y que incluso descendiera en algunos años. En los años cincuenta, la coordinación de la explotación del conjunto del sistema eléctrico a través de Unidad Eléctrica S.A.(UNESA), permitió un mejor aprovechamiento de los recursos

disponibles, haciendo posible que la productividad se triplicara de nuevo. Durante la década de los sesenta y principios de los setenta, la producción de energía eléctrica tuvo que aumentar con una gran rapidez a causa de la alta tasa de crecimiento de la demanda. Entre los años 1960 y 1973, la generación española de energía eléctrica se multiplicó por cuatro hasta el inicio de la crisis energética.

A finales de los ochenta volvieron a registrarse aumentos apreciables en la demanda de electricidad, aunque en los primeros años de la década de los noventa, las tasas de producción de electricidad volvieron a ser moderadas, como consecuencia del débil incremento de la demanda. Finalmente, en los últimos años del siglo XX y principios del XXI se ha incrementado la producción para el abastecimiento de la demanda eléctrica, debido a los altos niveles de actividad en la economía del país, con el lógico descenso actual de producción causado por la crisis que atraviesa el país.

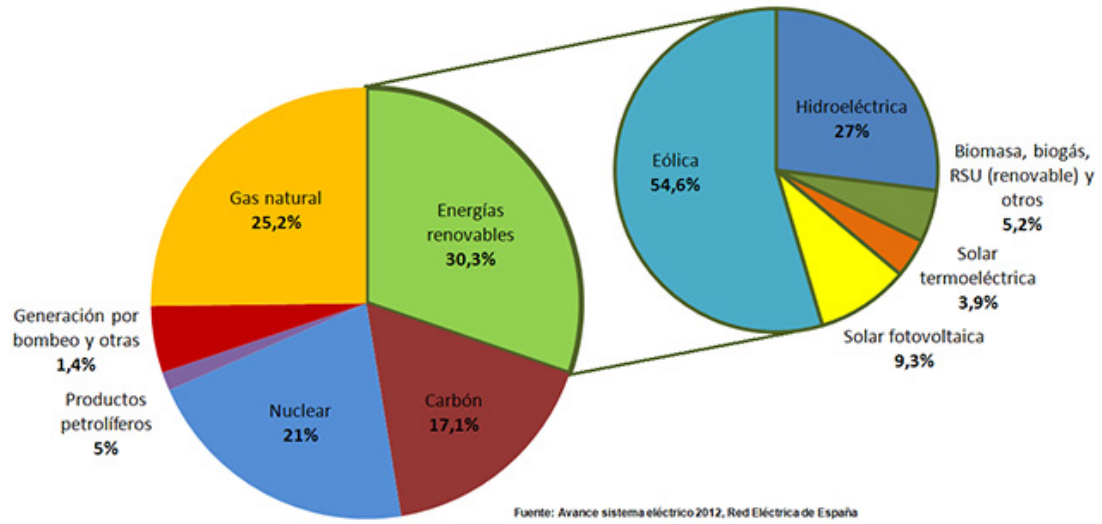
2.3.2- Situación actual

Como puede observarse en la Figura(9), la participación de las diferentes fuentes de energía en la producción eléctrica española ha sufrido un gran cambio en la última década. Por un lado, algunas de las fuentes de energía convencionales como el carbón han sufrido un descenso muy acusado. Por otro lado, datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) reflejan que se ha producido un aumento considerablemente importante del gas natural gracias a su uso en centrales de ciclo combinado, en especial hasta 2005, y un gran aumento de las energías renovables, sobre todo en los últimos años pasando de constituir un 18% del mix en el año 2005 a más de un 32% en el año 2010.



Figura(9): Participación de la fuentes de energía en la generación de energía eléctrica. Fuente: Datos de IDAE y Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

En la Figura(10) podemos ver como se reparte la generación entre los diferentes modos de producción dentro del 30% de las energías renovables. Como ya se ha dicho anteriormente, este gráfico deja constancia del gran desarrollo que ha sufrido la energía renovable de carácter eólico en nuestro país, llegando a constituir el 50% de la generación. Seguidamente encontramos la energía hidroeléctrica que en los últimos años ha dejado el papel de energía renovable principal que tuvo durante las últimas décadas, aun así su consumo y producción sigue manteniéndose aun un nivel similar.

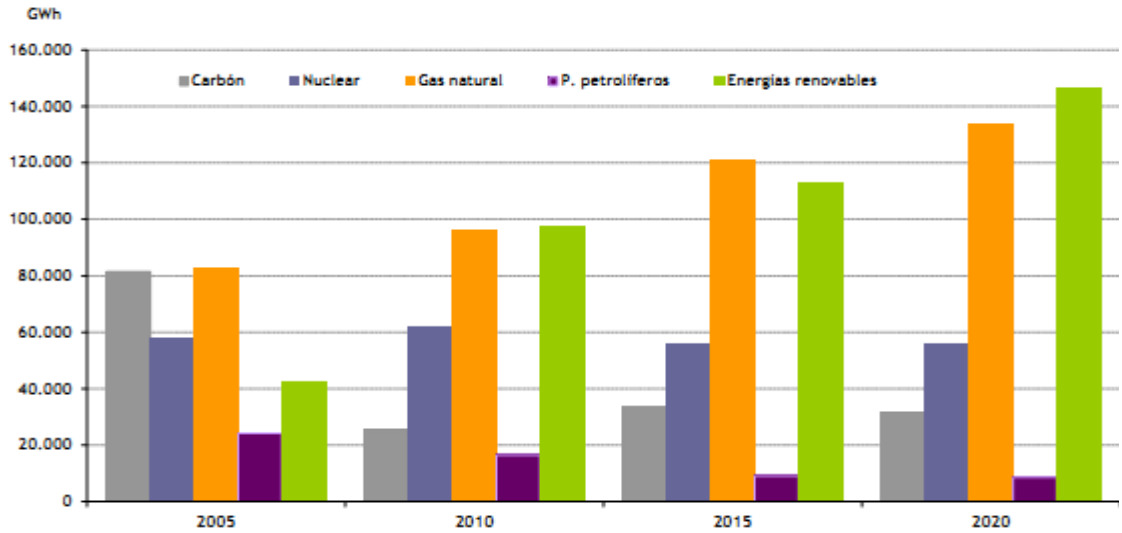


Figura(10): Distribución del mix eléctrico en 2012. Fuente: REE.

2.3.3- Situación futura

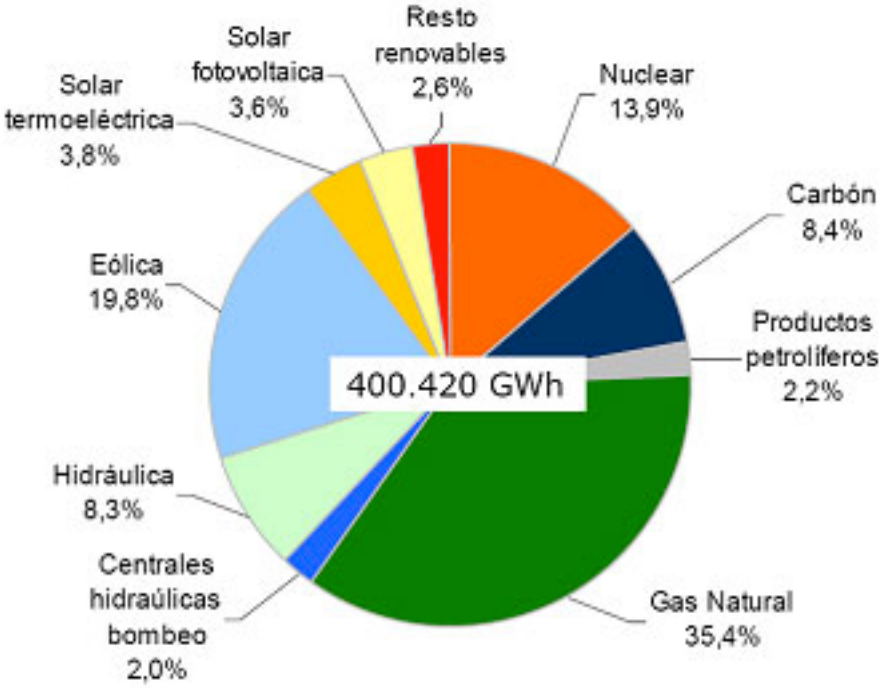
La UE se ha marcado unos ambiciosos objetivos para 2020: un 20% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, un 20% de mejora de la eficiencia energética y un consumo de energías renovables de un 20%. Se conoce como el objetivo 20/20/20.

En la Figura(11) se muestran los datos de cómo evolucionará la generación de energía eléctrica como consecuencia de los objetivos que se han marcado en el PER 2011-2020 y la política que se aplicará en relación a este tema. La tendencia es la disminución de las tecnologías de combustibles fósiles en beneficio del gas natural y las energías renovables. Más concretamente, como puede apreciarse, la generación eléctrica de carácter nuclear seguirá manteniéndose estable tal y como lleva haciendo durante bastante tiempo pero con una tendencia a la baja. El carbón se mantiene más o menos estable con un ligero aumento y la generación con productos petrolíferos irá descendiendo. Por el contrario, el gas natural aumentará hasta alcanzar una cobertura del 35% en el 2020 y las energías renovables se prevé que representen un 40% del total de la generación de electricidad, lo que supone un crecimiento anual de un 1,6%.



Figura(11): Evolución de aportaciones en la producción eléctrica española. Fuente: Datos del IDAE y Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

Si se hace un análisis dentro de las energías renovables, la energía eólica (terrestre y marina), se espera que genere aproximadamente un 50% del total de la producción de electricidad del conjunto de las energías renovables, lo que supondría un 20% del total de generación de electricidad. La segunda en participación sería la energía hidráulica con un 8,3% del total de generación eléctrica, seguida de la solar termoeléctrica con un 3,8% y de la solar fotovoltaica con un 3,6%.



Figura(12): Mix eléctrico español en 2020. Fuente: Datos del *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2011-2020*.

2.4- Centrales eléctricas Españolas

España presenta una asimetría peninsular en lo que se refiere a la generación y consumo de la energía eléctrica debido a que existen ciertas comunidades en las que el consumo neto es mayor la producción bruta o viceversa. A continuación, en la Figura(13) se muestra un mapa con los datos de generación y producción de cada comunidad. Dichos datos sacan a relucir que el mayor consumo de electricidad se registra en la Comunidad Autónoma de Cataluña, con un 17,91% del total, y es seguida en importancia por las Comunidades de Andalucía y Madrid, cuyas cuotas se cifran en un 14,25% y un 11,62%, respectivamente. A diferencia de Madrid, tanto Cataluña como Andalucía generan una cantidad de energía cercana a la que se consume, disminuyendo así su ineficiencia en el balance energético.

Figura(13): Energía eléctrica consumida y generada por comunidades autónomas. Fuente: UNESA.

En el año 2012 había en España unas 2.400 centrales eléctricas en funcionamiento. De ellas, más de 1.300 eran hidroeléctricas, y el resto eran centrales térmicas o grupos nucleares. Además de estas centrales, estaban operativos un número significativo de parques eólicos y otras instalaciones de producción de electricidad mediante energías renovables, como son las de biomasa y solares. Su distribución geográfica por Comunidades Autónomas es la que se recoge en la siguiente tabla:

	Hidráulicas	*Térmicas*	*Grupos Nucleares*
Andalucía	108	79	-
Aragón	105	68	-
Baleares	0	11	-
Canarias	2	13	-
Cantabria	25	14	-
Castilla-La Mancha	75	72	1
Castilla-León	204	78	-
Cataluña	336	200	2
Extremadura	25	5	2
Galicia	122	123	-
La Rioja	28	15	-
Madrid	15	52	-
Navarra	110	36	-
País Vasco	86	78	-
Principado de Asturias	41	24	-
Región de Murcia	15	20	-
Comunidad Valenciana	30	169	1
Ceuta y Melilla	0	2	-

Tabla(1): Centrales eléctricas distribuidas por comunidades autónomas. Fuente: UNESA.

Como se puede observar Cataluña es la comunidad autónoma con más centrales hidroeléctricas (la mayoría de ellas situadas en la zona noroeste) a pesar de ello, no es la que más energía genera de este tipo, ya que la mayoría de centrales son de poca capacidad. No obstante, Cataluña es la quinta de las comunidades autónomas que más energía de carácter renovable produce solo por detrás de Galicia, Castilla y León, Castilla-La Mancha y Aragón. Aun así, es tal la cantidad de demanda eléctrica en nuestra comunidad que dicha producción tan solo cubre un porcentaje escasamente superior al 10% de la demanda total de electricidad.

Electricidad Renovable en España (GWh)								
Comunidad Autónoma	***Hidráulica***	***Eólica***	***Solar***	***Biomasa***	***Residuos sólidos***	***Total Generación Renovable***	***Total Demanda Eléctrica***	***% Renovables respecto a la Demanda Total de Electricidad***
Castilla y León	5657	5449	310	234	55	11705	14120	82.9%
Aragón	3333	4010	78	111	49	7581	11168	67.8%
Castilla-La Mancha	659	6501	790	171	0	8121	12038	67.4%
Galicia	5506	6705	8	226	287	12732	20003	63.6%
Navarra	499	2304	168	253	0	3224	5511	58.5%
La Rioja	129	949	43	5	1	1128	1945	57.9%
Extremadura	1295	0	347	0	0	1642	4900	33.5%
Asturias	1608	551	0	214	390	2763	12153	22.7%
Cantabria	744	21	1	12	76	854	4868	17.5%
Andalucía	803	2481	425	896	35	4640	40174	11.5%
Cataluña	3958	643	141	92	266	5100	47421	10.7%
Comunidad Valenciana	1099	1139	200	23	2	2463	27805	8.8%
Región de Murcia	75	290	256	16	0	637	8706	7.3%
Canarias	2	379	63	0	229	673	9326	7.2%
País Vasco	389	348	15	119	481	1352	20895	6.4%
Baleares	0	5	28	0	134	167	6122	2.7%
Ceuta y Melilla	0	0	0	0	9	9	415	2.1%
Comunidad de Madrid	90	0	28	65	291	474	31823	1.5%
ESPAÑA	25845	31777	2903	2437	2306	65268	279392	23.4%

Tabla(2): Producción de electricidad con fuentes renovables. Fuente: Datos de la REE

2.5- Estudio de Cataluña

En el caso de Cataluña nos centraremos en una evolución más cercana, la experimentada en las últimas dos décadas sobretodo en las fuentes de especial interés para nuestro caso, las energías renovables en régimen especial.

2.5.1- Evolución de la producción

En la Tabla(3) se muestran los resultados estadísticos de la evolución de la producción de energía eléctrica en Cataluña obtenidos del IDESCAT para un periodo de estudio desde 1992 hasta 2009. En dicha tabla se ha separado la producción en régimen ordinario de la de régimen especial para poder observar la evolución de cada una por separado. Con estos resultados se puede comprobar el gran desarrollo de la producción en régimen especial, que supera al desarrollo sufrido por la de régimen ordinario tanto en términos de potencia instalada como de producción neta. Cuantificando este hecho, vemos un crecimiento de la potencia instalada de 2.000.000kW para régimen especial por los 1.500.000kW del régimen ordinario, por otro lado la producción neta en régimen especial ha aumentado en 8.500.000MWh pasando de representar el 5,7% de la producción total al 22% de esta.

Año	*Pot. Ord. (kW)*	*P.Bruta (MWh)*	*P.Neta (MWh)*	*Pot. Esp. (kW)*	*P.Bruta (MWh)*	*P.Neta (MWh)*	*P.Neta Total (MWh)*
2009	9.085.544,0	32.993.939,6	31.751.965,4	2.286.938,7	9.330.019,6	9.004.047,3	40.756.012,7
2008	9.096.272,0	37.989.628,1	36.597.819,6	2.037.443,8	8.579.797,7	8.244.408,5	44.842.228,1
2007	9.091.772,0	36.315.319,2	34.887.835,2	1.875.086,2	8.076.659,3	7.765.745,1	42.653.580,3
2006	8.256.472,0	37.185.004,7	35.642.803,4	1.774.766,3	8.135.212,7	7.820.251,2	43.463.054,6
2005	8.210.492,0	36.644.636,2	35.123.342,5	1.700.098,9	8.852.578,9	8.527.800,1	43.651.142,6
2004	8.210.492,0	39.104.478,8	37.613.078,4	1.685.704,6	9.055.501,0	8.737.990,0	46.351.068,4
2003	8.510.492,0	36.494.756,1	35.048.949,7	1.668.897,8	8.933.103,6	8.609.920,2	43.658.869,9
2002	7.697.742,0	33.946.242,9	32.526.518,7	1.668.433,9	8.303.405,4	8.022.794,2	40.549.312,9
2001	7.273.222,0	32.608.178,0	31.316.090,6	1.624.436,7	7.862.790,2	7.579.714,0	38.895.804,6
2000	7.255.749,0	31.334.350,7	30.151.598,3	1.551.966,0	7.959.048,4	7.682.512,2	37.834.110,5
1999	7.277.773,0	29.793.319,9	28.576.604,4	1.347.576,9	7.730.036,5	7.471.234,6	36.047.839,0
1998	7.547.685,0	29.710.968,8	28.621.914,8	1.192.460,9	6.734.161,4	6.521.739,9	35.143.654,7
1997	7.562.475,0	29.604.881,2	28.580.199,2	982.840,9	5.594.599,4	5.423.116,2	34.003.315,4
1996	7.539.950,0	29.006.518,8	28.048.259,8	854.128,9	4.520.698,7	4.391.896,4	32.440.156,2
1995	7.486.061,0	25.497.386,9	24.557.623,8	672.019,9	3.342.395,0	3.246.146,9	27.803.770,7
1994	7.488.095,0	26.850.893,2	25.892.740,7	581.592,9	2.752.502,5	2.675.915,5	28.568.656,2
1993	7.499.895,0	25.989.217,7	25.031.325,7	467.486,9	1.965.761,9	1.901.216,6	26.932.542,3
1992	7.499.980,0	28.292.849,7	27.256.626,8	348.079,9	1.708.690,3	1.644.941,4	28.901.568,2

Tabla(3): Producción energía eléctrica en Cataluña, régimen ordinario y especial. Fuente: Datos del "Institut Català d'Energia" .

La producción bruta de energía eléctrica en Cataluña el año 2009 fue de 42.323,7GWh. La producción de energía eléctrica neta se situó en 40.756,012GWh durante este año. La disminución de la producción nuclear y de las centrales hidráulicas, principalmente, en el periodo 2005-2009, supuso que el año 2009 el 18,1% de la demanda del sistema eléctrico catalán fuera cubierta mediante intercambios eléctricos utilizando las interconexiones eléctricas de Cataluña.

En términos globales, la producción bruta de energía eléctrica con energías renovables en 2009 representó un 14,6% respecto el total. Hay que destacar que en el periodo 2005-2009, la producción de energía eléctrica a partir de energía eólica aumenta en 669,6ktep, contribuyendo en un 39,2% en el incremento de la producción de energía eléctrica del régimen especial en este periodo.

En el marco de las tecnologías de producción, últimamente la aportación más importante provenía de la energía nuclear y de los ciclos combinados, con un 30% y un 20% aproximadamente. En segundo término, la producción bruta de energía eléctrica mediante tecnología de cogeneración aportaba alrededor de un 15%, mientras que la energía hidroeléctrica establecía un 10% de la producción bruta total dependiendo del año. Actualmente la participación de la nuclear se ha visto reducida a un 20% del total, mientras que la tecnología de ciclo combinado ha caído hasta el 10%, dando paso a fuentes como la eólica. Todos los porcentajes se han obtenido del "Institut Català d'Energía".

Centrándonos más ahora en las energías renovables de más interés, en la Tabla(4) podemos observar una evolución más particular de la energía eléctrica de origen eólico, hidráulico y fotovoltaico. Empezando por la fotovoltaica, su desarrollo empezó a ser notable a partir de 2003, cuando su producción se duplicó prácticamente cada año hasta 2006 y siguió su crecimiento exponencialmente. Aunque de momento no es una de las más importantes se está trabajando para poder aumentar su producción.

Uno de los problemas que tiene la energía hidroeléctrica es que depende de la precipitación media anual. Este hecho se puede apreciar en la Tabla(4) para el periodo 2005-2007, donde vemos un descenso considerable en la producción neta de energía eléctrica, esta tiene valores de 600.000MWh cuando lo normal venia siendo del orden de 900.000MWh. Intentando buscar el porque de este cambio, si contrastamos este resultado con la información de precipitación en España observamos que en este periodo España sufrió una de las peores épocas de sequía durante las últimas décadas.

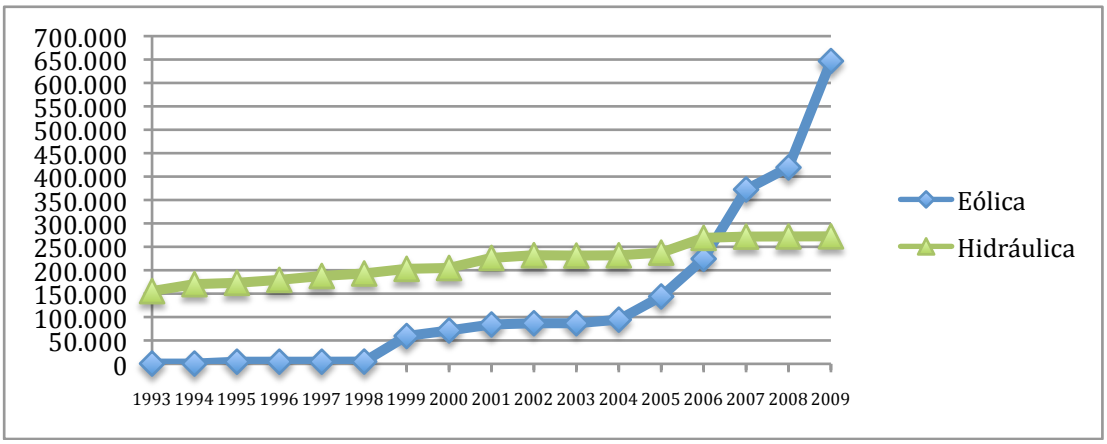
Respecto a la energía de fuente eólica, en Cataluña se ha producido una evolución idéntica a la del conjunto del país, así lo reflejan los datos de la Tabla(4) con ese raudo crecimiento en el periodo actual. Aún siendo una fuente en la que no podemos controlar el instante de producción, ha pasado de ser una de las menos utilizadas a una fuente de referencia dentro de las renovables. Los futuros objetivos, en lo que a la producción de energía se refiere, incluyen seguir potenciando esta fuente para hacerla cada vez más importante en términos de producción total de energía.

Año	*Tipo de instalación*	*Pot(kW)*	*PB(MWh)*	*PN(MWh)*
2009	Eólica	646.750,0	912.681,2	881.726,9

2009	Fotovoltaica	164.799,7	278.237,3	278.237,3
2009	Hidráulica	272.401,0	975.767,4	965.228,5
2008	Eólica	419.480,0	769.756,1	744.621,5
2008	Fotovoltaica	161.205,8	121.337,2	121.321,4
2008	Hidráulica	272.168,0	802.076,4	792.359,6
2007	Eólica	372.480,0	496.463,2	482.847,3
2007	Fotovoltaica	33.613,2	28.631,0	28.566,0
2007	Hidráulica	271.857,0	613.792,0	606.177,8
2006	Eólica	224.340,0	317.098,2	307.135,2
2006	Fotovoltaica	9.399,3	7.445,6	7.407,9
2006	Hidráulica	269.145,0	658.628,5	649.755,7
2005	Eólica	143.930,0	243.047,9	238.922,7
2005	Fotovoltaica	3.276,9	3.592,8	3.563,9
2005	Hidráulica	237.622,0	634.277,6	627.380,3
2004	Eólica	94.430,0	205.932,4	203.659,6
2004	Fotovoltaica	2.403,6	2.094,8	2.066,6
2004	Hidráulica	231.849,0	942.012,7	932.297,1
2003	Eólica	86.740,0	163.094,0	160.899,3
2003	Fotovoltaica	1.241,8	1.015,9	1.005,9
2003	Hidráulica	231.305,0	1034868,6	1023179,6
2002	Eólica	86.740,0	172.147,6	169.743,8
2002	Fotovoltaica	809,0	345,8	342,7
2002	Hidráulica	232.097,9	807.239,8	797.973,3
2001	Eólica	84.100,0	163.111,4	161.016,7
2001	Fotovoltaica	129,8	137,9	137,1
2001	Hidráulica	226.325,9	825.951,7	818.479,1
2000	Eólica	71.350,0	138.126,2	137.564,1
2000	Fotovoltaica	75,1	97,4	96,8
2000	Hidráulica	204.843,9	729.309,1	722.048,3

Tabla(4): Producción en régimen especial. Fuente: Elaboración propia con datos del "Institut Català d'Energia" .

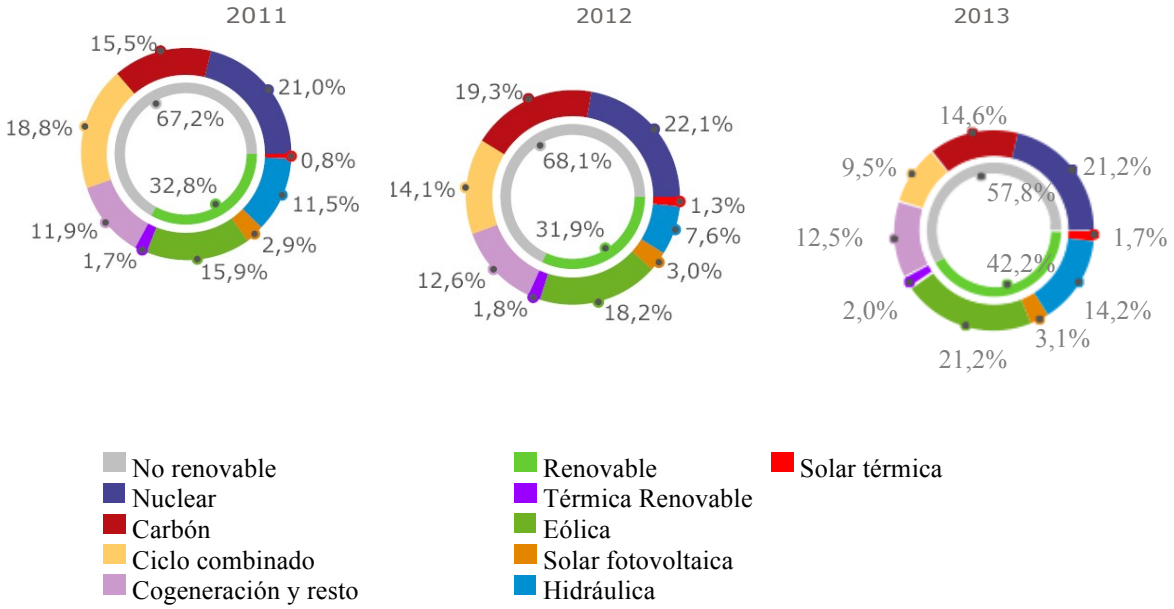
La gráfica de la Figura(14), obtenida de los datos de la tabla superior, muestra la evolución de la potencia instalada tanto para la energía hidráulica como la eólica. Esto nos sirve para corroborar las conclusiones obtenidas anteriormente, dicha gráfica plasma la regular tendencia creciente por parte de la energía hidráulica, y como prácticamente la potencia instalada de energía eólica era insignificante en los años 90 y aumentó en 550.000kW en tan solo 6 años permitiendo así convertir esta fuente en la líder de las renovables.



Figura(14): Evolución de la potencia instalada en Cataluña en [kW]. Fuente: Elaboración propia con datos del "Institut Català d'Energia" .

2.5.2- Situación actual

En la Figura(15) podemos ver la evolución del mix eléctrico catalán en los últimos años. Se observa que la producción con fuentes renovables y en régimen especial ha crecido considerablemente hasta 2013, aumentando en 10 puntos porcentuales en tan solo 2 años. Dicho cambio ha sido, mayormente, en detrimento de la energía producida con carbón y con ciclo combinado, por otro lado, la producción que más ha crecido ha sido la de energía eólica. Tampoco se debe pasar por alto que aunque su actual aportación sea pequeña, la energía solar térmica ha logrado duplicar su producción en el periodo de 2011-2013 y se prevé que siga aumentando en los años venideros.



Figura(15): Evolución del mix eléctrico en Cataluña. Fuente: REE.

Los cambios observados en la particularización de Cataluña son muy similares a los comentados anteriormente para el caso del estado español al completo, donde la energía más perjudicada en estos últimos años ha sido la producida con carbón al igual que en el caso catalán. Es también un hecho real, que la homóloga de la energía eléctrica de origen eólico catalana en el estado, ha sido con gran diferencia la más desarrollada recientemente, incluso la similitud se extiende a la cantidad porcentual de producción de energía eléctrica que cubren cada una de ellas, siendo, en 2013, aproximadamente el 50% de las fuentes renovables.

El caso de la energía eléctrica de origen hidráulico ocurre exactamente lo mismo que con la eólica, su evolución tanto en la región catalana como en todo el país es muy similar. A lo largo de los años ha conservado un nivel de producción con pequeñas fluctuaciones locales, según la lluvia de cada año, pero consiguiendo mantener, en general, un nivel de producción con un crecimiento constante. La energía hidráulica ha sido durante las últimas décadas y hasta 2005 la fuente renovable más utilizada para producir energía eléctrica, cediendo protagonismo en estos últimos años a la eólica.

3-Estudio del terreno

Una vez finalizado el estudio de la energía en nuestro país, nos centraremos en conocer las características de la zona noroeste de Cataluña. Más concretamente los cursos tanto del Noguera Ribagorzana como del Noguera Pallaresa.

El objetivo de este trabajo es concluir si se podría mejorar de alguna manera la productividad hidroeléctrica en esta zona para disminuir la dependencia actual de la energía eólica y poder evitar problemas a la hora de satisfacer la demanda de energía en todo momento, sin descuidar las altas exigencias de regadío de la zona.

Para solventar problema los problemas de generación de energía eléctrica debido a la irregularidad eólica y de regulación de agua en las cuencas de los Nogueras, se propone la construcción de un aprovechamiento reversible que conecte ambos ríos con el fin de bombear agua a un depósito elevado en horas de excedencia de energía y turbinar el agua cuando la demanda así lo requiera. Además el aprovechamiento reversible propuesto también dará la posibilidad de pasar agua de un río al otro, solucionando de esta manera otro de los hándicaps que tienen los ríos que se estudian, ya que el Noguera Pallaresa tiene un caudal elevado y carece de espacio para almacenar tanta agua, tan solo puede almacenar el 40% del agua, de manera que algunos de sus embalses están llenos la mayor parte del año. Precisamente la situación contraria sucede en el Noguera Ribagorzana, donde su caudal es significantemente menor y la capacidad de sus embalses es más del doble que los del Pallaresa pudiendo almacenar el 190% del agua que discurre por el río. A primera vista parece que el trasvase de agua solo sería necesario del Noguera Pallaresa al Noguera Ribagorzana, pero lo bueno de la conexión planteada es que la operación también se puede realizar en sentido inverso permitiendo así recuperar el agua del Noguera Pallaresa en las épocas en que sea necesario para cubrir las necesidades de regadío existentes al sur de su desembocadura en el río Segre. Por estos motivos creemos que una solución de este estilo sería la adecuada en esta zona permitiendo paliar los diferentes inconvenientes que se presentan a lo largo del año, pudiéndonos adaptar a diversas situaciones.

	Aportación Natural (hm^3/año)	*Capacidad total de los embalses (hm^3)*	*Capacidad total emb. / Aportación natural*	*Embalses (capacidad en hm^3)*
N. Ribagorzana	569	1.105	1,9	Baserca (22) Escales(152) Canelles(678) Santa Anna(237)
N.Pallaresa	1.055	391	0,4	Sant Antoni (205) Terradets(23) Camarasa(163)

Tabla(5): Descripción de los ríos, solo se han tenido en cuenta embalses superiores a 20hm^3. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del Plan hidrológico de la cuenca del Ebro.

Los dos ríos tienen una capacidad total de embalse de 1.496 hm^3, de los cuales 391 hm^3 forman parte del Noguera Pallaresa y 1.105 hm^3 del Noguera Ribagorzana. Por separado, la aportación y la capacidad de embalse están significativamente desequilibradas, pero si tenemos en cuenta la aportación total de estos ríos (1.624 hm^3),

los 1.500 hm^3 de volumen de embalse representa el 92% de las aportaciones naturales. Es por este motivo que para llevar a cabo una buena regulación de las cuencas sería necesario que estas estuvieran interconectadas, que es precisamente lo que se pretende conseguir con la construcción de la central hidroeléctrica de bombeo.

Para saber si la solución propuesta es factible y en que lugar es mejor aplicarla, se procederá a estudiar el carácter de la demanda de agua en la zona de estudio, los diferentes embalses que encontramos a lo largo de los cursos de los ríos y la topografía del terreno.

3.1- Demanda de agua en la cuenca del Segre

El territorio catalán se puede subdividir hidrológicamente hablando en las Cuencas Internas de Cataluña (CIC) y las Cuencas Catalanas del Ebro (CCE). En la Tabla(5) se presentan los datos más significativos obtenidos del Plan hidrológico de la cuenca del Ebro tanto de las CIC como del las CCE (teniendo en cuenta solo el área que afecta al río Segre).

Como se puede observar en la Tabla(5) la mayor demanda de agua para aspectos urbanos y industriales se encuentra en las CIC llegando a establecer el 88% de la demanda total, mientras que en la cuenca del Segre la demanda de este tipo es prácticamente nula, con tan solo el 8%, representado un uso notablemente secundario en la zona.

Es cierto que la demanda agraria se encuentra presente en la totalidad de las provincias y comarcas de Cataluña aunque, lógicamente, su importancia es muy variable. En La provincia de Lleida encontramos más de 150.000ha de superficie cultivada regada, más de la mitad de la existente en el total de Cataluña. Las comarcas que cuentan con más superficie de regadío son el Segrià, la Noguera y el Urgell, donde la mayor parte de cultivos son frutales y cereales, y el riego se lleva a cabo principalmente con las aportaciones del Noguera Pallaresa y del Segre.

Es por ello, que en las cuencas del Noguera Pallaresa y el Noguera Ribagorzana, debido al bajo índice de ocupación del territorio, la mayor parte de demanda de agua es para los regadíos sobre todo para los que se encuentran al sur de su desembocadura en el Segre y en gran parte también para la producción de energía hidroeléctrica.

	Superficie (1000Km2,%)		***Población (millones,%)***		***Superficie regada (1000ha, %)***		***Recursos naturales propios (hm3/año, %)***		***Demandas (hm3/año,%)***					
									Total		Urbana y Industrial		Agraria	
CCE Segre	10,8	34	0,4	5	144	56	2.479	42	1.194	40	65	8	1.129	54
CIC	16,4	51	6,8	92	66	26	2.613	45	1.131	38	746	88	385	18
Cataluña	32,1	100	7,5	100	255	100	5.836	100	2.965	100	851	100	2.114	100

Tabla(6): Datos hidrológicos de las cuencas catalanas. Fuente: Datos obtenidos del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro y del Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña.

Nota: Se entiende por recursos naturales propios el volumen medio anual de caudal aportado de carácter superficial (ríos) y subterráneo (acuíferos) de las diferentes cuencas. Solo se ha tenido en cuenta la mitad de la aportación de la cuenca del Noguera Ribagorzana ya que gran parte está en territorio aragonés.

Estos datos dejan constancia de que en la zona donde se estudia la construcción del aprovechamiento hidroeléctrico reversible encontramos más de la mitad de la superficie regada de Cataluña y el 54% de la demanda agraria, por tan solo el 18% de las cuencas interiores, donde la mayor demanda es de carácter urbano. El resto de tierras de regadío se encuentran en la zona del delta del Ebro. Queda así remarcada una de las principales necesidades que nos permitiría solucionar un aprovechamiento reversible, el hecho de poder retornar el agua cedida por parte del Noguera Pallaresa al Noguera Ribagorzana, para poder satisfacer esta gran demanda de regadío sin problemas.

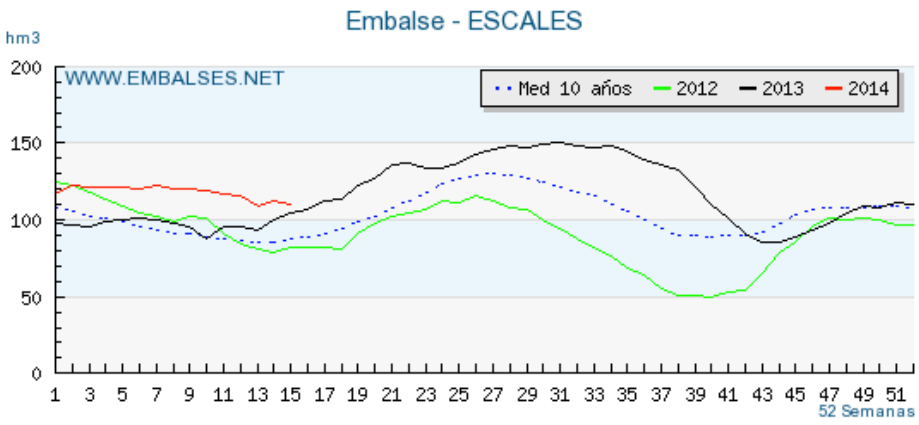
3.2- Características de los embalses

3.2.1 Noguera Ribagorzana

El Noguera Ribagorzana es un río afluente del Segre que nace en el valle de Barravés, situado en el Valle de Arán. Tiene una longitud de 130km, una buena parte de estos coincide con la frontera política catalano-aragonesa y lleva un caudal medio anual de alrededor de $17m^3/s$. A lo largo del curso del río nos encontramos con diversos embalses como son Escales, Canelles y Santa Anna. Dichos embalses sirven sobretodo para la producción de energía hidroeléctrica y el regadío y en parte también para el abastecimiento de las poblaciones circundantes.

De los embalses nombrados el que primero encontramos en el curso del río es el embalse de Escales, situado cerca del municipio de Tremp a 821m sobre el nivel del mar, y construido en 1955 para producir energía y permitir el regadío de los campos cercanos. Tiene una capacidad total de 152 hm^3 llegando a ocupar una área de 400ha. Posee una central subterránea a pie de presa que dispone de tres grupos de generación con un caudal de turbinación de $39m^3/s$ y una potencia de 36MW, con el embalse se llega a conseguir un salto de agua de 117m. Aguas abajo de la presa, en el embalse de Sopeira, parte un canal que conduce el agua turbinada hasta la central de Montañana donde dicha agua se vuelve a turbinar, devolviendo posteriormente el agua al río en la cola del embalse de Canelles.

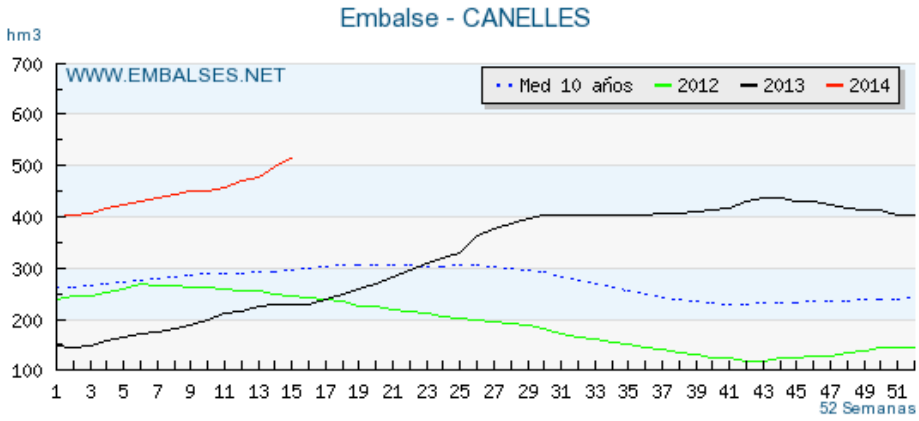
La gráfica que viene a continuación muestra la evolución del nivel del embalse durante los últimos años, éste alcanza sus niveles máximos en el periodo de verano que normalmente es la época en que más reservas de agua se necesitan debido a la escasez de precipitaciones.



Figura(16): Evolución de los niveles del embalse de Escales. Fuente: Datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

El embalse de Canelles se creo mediante una presa de arco de doble curvatura de 150 m de altura en 1.953 que presentó problemas de fuga de agua, por los macizos anexos a la presa, en su primer llenado. Tiene una capacidad de 688hm^3 ocupando un área de 1.500ha, estas dimensiones lo convierten en el embalse más grande de la cuenca del Segre y el segundo en la cuenca del Ebro solo por detrás de Mequinenza. Consta de una central hidroeléctrica excavada en la roca a pie de presa, con una potencia instalada de 108MW y una producción anual superior a los 110GW/h, capaz de trabajar con un caudal de 100m^3/s y alcanza una altura de agua de 135m. Estas características la convierten en la central más importante del Noguera ribagorzana y una de las de mayor aportación energética en la cuenca del Segre.

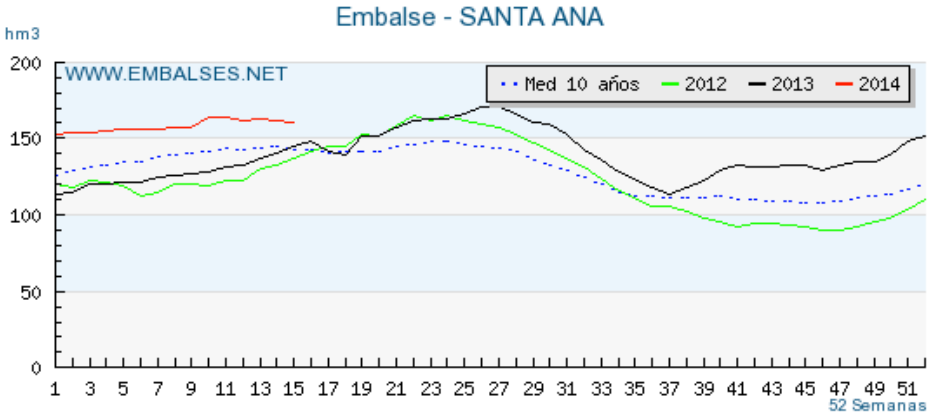
Debido a su gran capacidad el embalse solo se ha logrado llenar una vez desde que se creó. Los niveles de éste suelen estar alrededor del 40% de su capacidad, aunque podemos observar en la Figura(17) como durante 2013 y 2014 existe una tendencia creciente en su nivel, logrando alcanzar el 72% hoy en día.



Figura(17): Evolución de los niveles del embalse de Canelles. Fuente: Datos de la CHE.

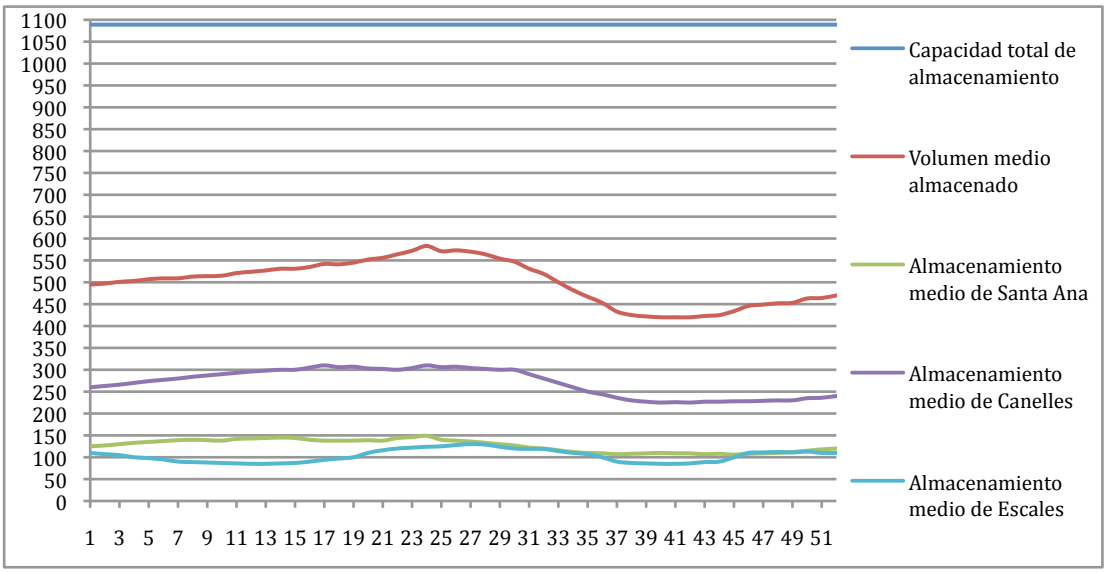
El embalse de Santa Ana está situado aguas abajo del embalse de Canelles, al que sirve de contraembalse, tiene un volumen de 237hm^3 que ocupan un área de 768ha. Como los demás embalses del Noguera Ribagorzana sus usos son principalmente generar energía eléctrica y el riego de los cultivos. El aprovechamiento hidroeléctrico está situado a pie de presa, en el margen izquierdo, se encuentra a 348m sobre el nivel del mar y el salto

de agua que se consigue en este caso es de 72m, considerablemente menor respecto las anteriores. La central trabaja con caudal de turbinación de 50m^3/s y tiene una potencia instalada de 30,4MW. Una vez turbinada el agua, esta se vierte al canal de Piñana para utilizarla para los riegos y el abastecimiento de Lérida, en caso de que la central eléctrica esté parada el agua para el abastecimiento se coge de los desagües de fondo. En este embalse los niveles del agua tienen una variación regular durante los últimos 10 años, variando entre 150hm^3 y 110hm^3.



Figura(18): Evolución de los niveles del embalse de Santa Ana. Fuente: Datos de la CHE.

Una vez analizados por separado los diversos embalses tratamos de caracterizar su comportamiento en el conjunto del río para saber que influencia tienen. En la Figura(18) se muestran los niveles medios de los últimos 10 años de cada embalse, el volumen total de agua almacenada en todos ellos y la capacidad total de almacenamiento que tienen. Se puede apreciar la fluctuación que tienen los embalses, donde los de Escales y Santa Ana mantienen su nivel con una cierta constancia entre 100 y 150hm^3, mientras que el embalse de Canelles presenta una mayor variación, entre 310 y 220 hm^3.



Figura(19): Análisis de la regulación del Noguera Ribagorzana. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la CHE.

Se puede observar una gran similitud entre la curva de volumen medio almacenado y la curva de almacenamiento del embalse de Canelles, este hecho nos deja entrever que el principal embalse regulador del caudal del río es el de Canelles, así pues establecer la

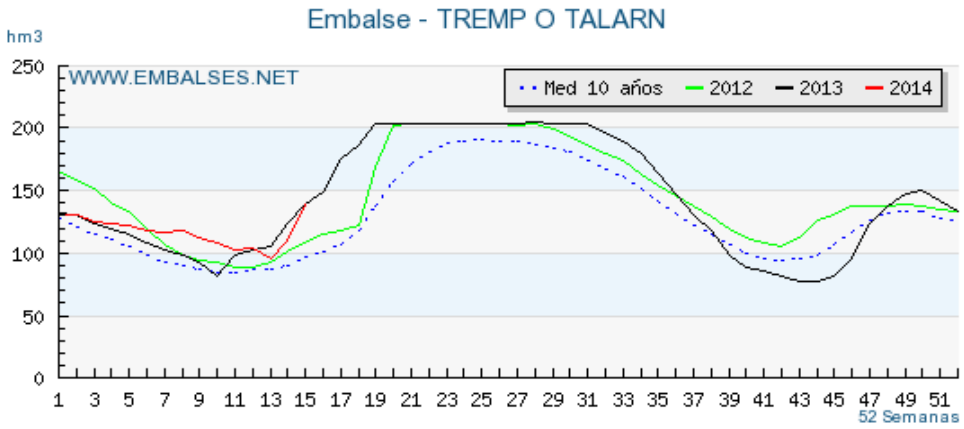
conexión en este embalse nos permitiría un mayor rango de posibilidades y alternativas para poder paliar las diferentes necesidades. A su vez, queda plasmado también la gran diferencia en cuanto a la capacidad y volumen almacenado que es menos de la mitad durante la mayoría del tiempo.

3.2.2 Noguera Pallaresa

El Noguera Pallaresa nace en el Valle de Arán, con dirección hacia el sur convirtiéndose en uno de los ejes articuladores de la vida en las comarcas del Pallars. Tiene un caudal medio anual de 37,57 m^3/s, llegando a los 55,81 m^3/s en su máximo anual. A lo largo de los 154Km de curso encontramos tres importantes embalses, el primero y el de mayor capacidad es el pantano de Sant Antoni (Talarn), más adelante, justo antes de llegar al desfiladero de los Terradets encontramos el embalse con el nombre del propio desfiladero, y por último antes de que el Noguera Pallaresa desemboque en el río Segre se encuentra el embalse de Camarasa.

El embalse de Sant Antoni lo forma una presa situada en el estrecho de Susterris, en el municipio de Talarn. La construcción tanto de la presa como de la central hidroeléctrica se inició en 1913 provocando un aumento de la riqueza en la zona y una renovación en los pueblos de alrededor, además este embalse también sería utilizado para el regadío. El embalse tiene una longitud aproximada de 11Km con una altura de agua máxima de 75m y la energía extraída del aprovechamiento instalado llega a 35MW con un caudal de turbinación de 60m^3/s, de los cuales, hasta 15m^3/s pueden derivarse a la central de Gabet situada a 8km de la central de la presa. La capacidad es de 205hm^3 ocupando una área de 927ha, lo que lo convierte en el más grande en el curso del río y en el quinto de Cataluña.

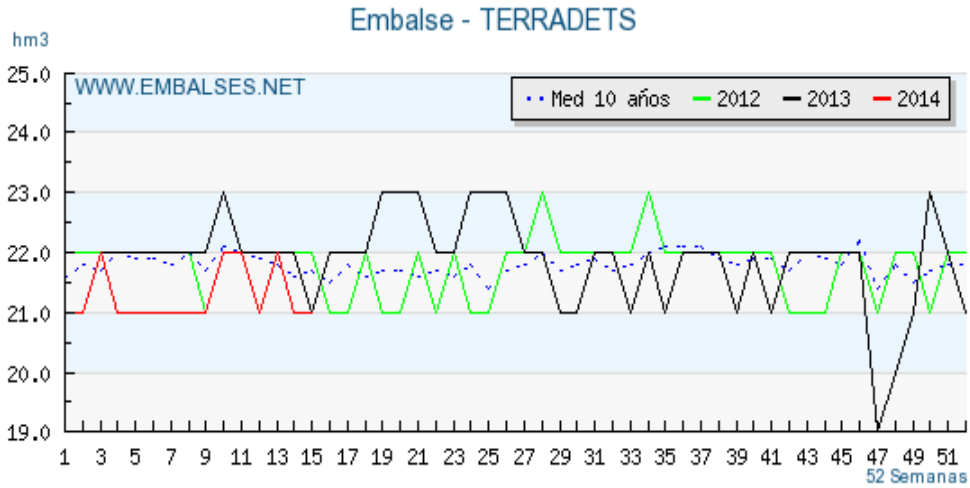
En la Figura(20) se muestra la evolución del embalse en los últimos años. Como es lógico los niveles máximos se alcanzan en la época de verano y debido a la cantidad de agua que lleva el río, ésta permite llenar el embalse al completo. Éste hecho pone de manifiesto uno de los factores que nos empujan a proponer la solución de un aprovechamiento reversible para conectar ambos Nogueras y poder pasar agua de un río a otro.



Figura(20): Evolución de los niveles del embalse de Sant Antoni (Talarn). Fuente: Datos de la CHE.

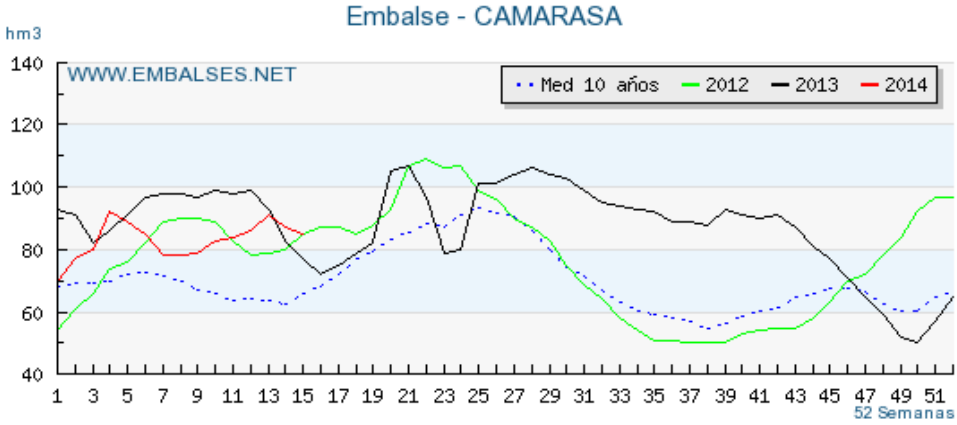
Aguas abajo del embalse de Sant Antoni nos encontramos con el pantano de los Terradets, está formado por una de las presas que configuran el sistema de obtención de energía eléctrica de la parte alta del Noguera Pallaresa y fue construido por la misma empresa que ordenó realizar el embalse de Sant Antoni. No es un pantano de gran capacidad, puede albergar 23hm^3 llegando a ocupar un área de 330ha con una longitud de 8km, situando la cota de agua en 412m sobre el nivel del mar y consiguiendo un salto hidráulico de 32m. La central hidroeléctrica trabaja con un caudal de 135m^3/s y tiene una potencia instalada de 32,5MW. Se llegan a producir anualmente 57GW/h, siendo la mínima cota útil de 402m (altura mínima con la que se puede producir energía).

En el caso del embalse de Terradets vemos en la Figura(21) una evolución muy controlada a lo largo de los años, variando entre 21hm^3 y 23hm^3 su capacidad, esto es posible gracias al excedente de agua que tenemos y a que es un embalse de una capacidad relativamente pequeña, lo que permite tener el nivel de agua deseado en cualquier época del año. Su reducida capacidad provoca que su participación en la regulación del río sea menor que la de otros embalses.



Figura(21): Evolución de los niveles del embalse de Terradets. Fuente: Datos de la CHE.

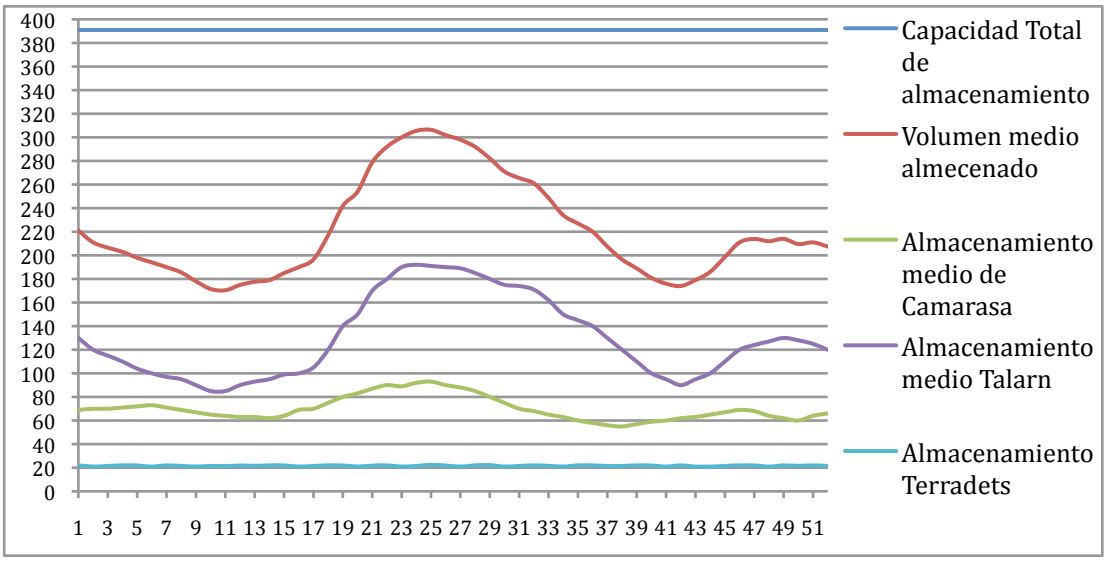
Por último, el embalse de Camarasa es el situado más al sur, fue construido en 1920 por la misma empresa (La Canadiense) que los dos embalses anteriores en el Noguera Pallaresa. Tiene una capacidad de 163hm^3 llegando a ocupar una distancia longitudinal de 20km y una superficie de 624ha, está situado a 329 metros sobre el nivel del mar y constituye un salto de agua de 78m. La central hidroeléctrica se encuentra a pie de presa y tiene una potencia instalada de 60MW donde el caudal de turbinación es de 118m^3/s. Este embalse presenta una variación anual más irregular que los anteriores, sin llegar a alcanzar su capacidad máxima, situando su nivel cerca del 50% de capacidad durante la mayor parte del año.



Figura(22): Evolución de los niveles del embalse de Camarasa. Fuente: Datos de la CHE.

Siguiendo el mismo procedimiento, una vez observados los embalses por separado, en la Figura(23) analizamos la influencia de cada uno en el comportamiento global del río. Se puede comprobar también en la misma figura la reducción de la distancia entre la curva de volumen medio almacenado y la de capacidad total de almacenamiento respecto el caso del Noguera Ribagorzana, ratificando el hecho de que los embalses del Noguera Pallaresa están por lo general, más cerca de su capacidad y la posibilidad de trasvasar agua al Noguera Ribagorzana sería beneficiosa para el conjunto.

En lo referente a los embalses, en este caso, vemos que el embalse de Terradets debido a su baja capacidad y variación tiene una contribución prácticamente nula en la regulación del Noguera Pallaresa. Por lo que respecta a los demás embalses, la mayor fluctuación la presenta el embalse de Talarn, que presenta niveles desde 190 a 80 hm^3 mientras que el nivel de Camarasa está entre 100 y 50 hm^3. Estos dos últimos son los dos grandes embalse reguladores del Noguera Pallaresa y aunque el embalse de Talarn presenta una mayor capacidad reguladora, el de Camarasa cuenta con la central más importante en términos de potencia instalada y producción del sistema del Noguera Pallaresa. Así pues, cualquiera de los dos sería uno de los posibles embalses en los que situar el aprovechamiento reversible con tal de obtener una buena capacidad de reacción en frente de los cambios de las necesidades tanto de demanda hidroeléctrica como de regadío.



Figura(23): Análisis de la regulación del Noguera Pallaresa. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la CHE.

Con los resultados obtenidos en el estudio de los embalses vemos que sí que sería factible la construcción de una central hidroeléctrica de bombeo que permita hacer trasvases de un río a otro, pues, la mayoría de los embalses del Noguera Pallaresa están llenos en algún momento del año, y el agua sobrante podría utilizarse en el otro Noguera ya que se ha visto que sus embalses suelen estar alrededor del 60% de la capacidad y de igual modo se podría aumentar el caudal de agua en el Noguera Pallaresa en la época de más exigencia del regadío de cultivos.

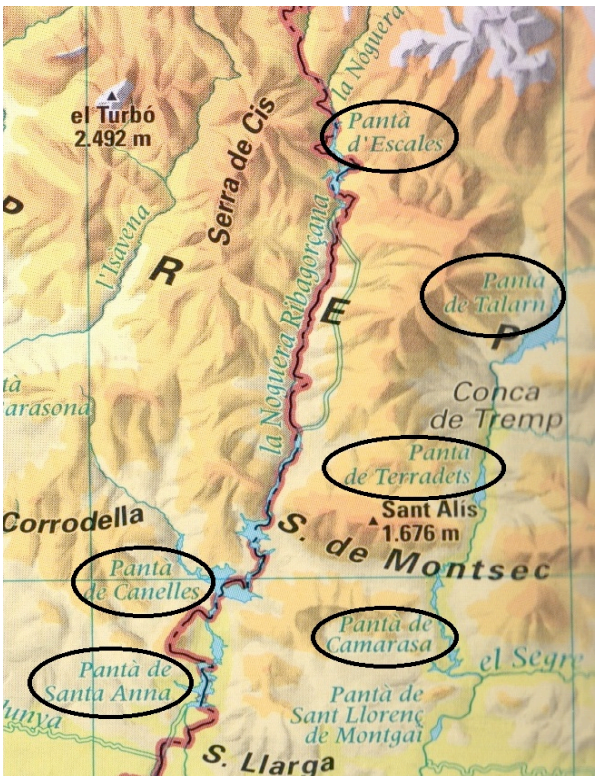
Fijándonos en los niveles de los embalses y en aquellos que realmente tienen una capacidad reguladora del río, las conexiones, a primera vista, más factibles por parte del Noguera Ribagorzana involucrarían el embalse de Canelles, que es el que presenta mayor fluctuación de niveles y el que tiene más capacidad para almacenar agua ya que observando las Figuras(17) y (19) vemos que aunque actualmente su nivel a lo largo del año está incrementando, aún tiene bastante capacidad para almacenar más agua y controla en gran medida la regularidad del río. Por otro lado si la conexión se establece entre el embalse de Escales y el de Sant Antoni, el trasvase de agua se producirá más arriba en el curso del Noguera Ribagorzana que en el anterior caso, pudiendo aprovechar el agua en más saltos hidroeléctricos en el curso del río, y dicha conexión involucraría el principal embalse regulador del Noguera Pallaresa.

La capacidad de almacenamiento de los embalses no es suficiente para tomar la decisión de donde instalar el aprovechamiento, para ello, es necesario mirar si es factible la conexión en cuanto a términos de separación y desnivel se refiere. Para ello se procederá a observar la zona de estudio mediante un mapa físico para saber el desnivel que se podría llegar a conseguir y elegir los embalses mejor posicionados para realizar la construcción del aprovechamiento reversible.

3.3- Topografía del terreno

A continuación se muestra la situación geográfica de los embalses nombrados con anterioridad con el fin de saber que conexiones son más viables. El mapa de la Figura(24) utilizado para el conocimiento global de la zona está en escala 1: 920.000, mientras que los utilizados para el análisis más detallado de las diferentes alternativas, Figuras(25) y (26) están a escala 1 : 300.000. Todos ellos han sido extraídos de un atlas geográfico de Cataluña.

En la Figura(24) podemos ver una imagen completa de la zona de estudio, donde aparecen los cursos de los ríos y la topografía existente entre ambos. Están remarcados los embalses analizados con los cuales plantearemos las diferentes alternativas en las que se podría construir la central hidroeléctrica de bombeo.



Figura(24): Mapa físico de la zona de estudio. Fuente: Atlas geográfico de Cataluña.

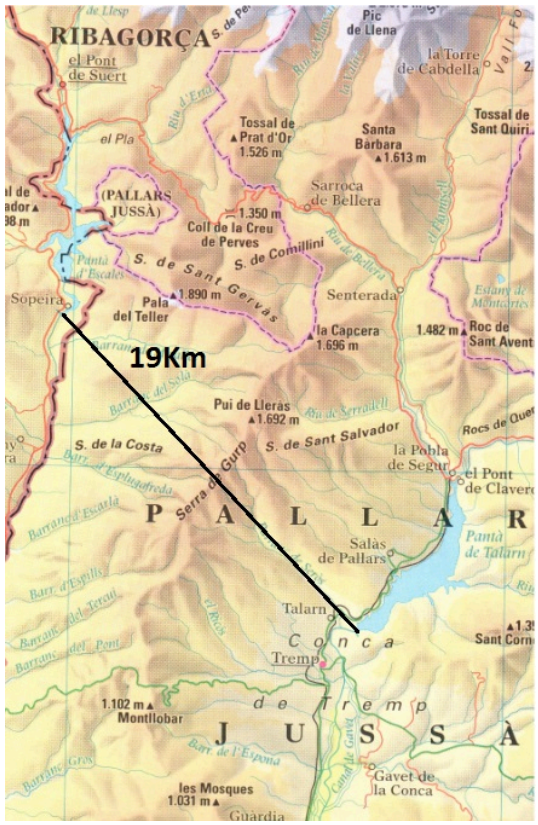
3.3.1- Planteamiento y selección de alternativas

Observando el mapa de la Figura(24) las conexiones con más probabilidad de éxito, en lo que proximidad y desnivel se refiere, serían Escales-Talarn (Sant Antoni), Canelles-Terradets, Canelles-Camarasa, Santa Ana-Camarasa. Para establecer estas alternativas a parte de los aspectos topográficos se han tenido en cuenta los resultados obtenidos con anterioridad, pues en todas ellas, al menos uno de los dos embalses involucrados es de los que resultaban más beneficiosos desde el punto de vista de regulación de los ríos y nivel de los embalses. Todas estas alternativas se analizan más detalladamente a continuación.

Empezando por la alternativa de la conexión entre el embalse de Escales y el de Talarn, se puede observar en la Figura(25) que están separados por una distancia de 19Km. en línea recta. La cadena montañosa que separa ambos ríos a esta altura, la Sierra de Gurp, nos ofrece la posibilidad de alcanzar un desnivel de 1.100m aproximadamente por el lado del embalse de Talarn y de 800 m por el lado del embalse de Escales ya que están situados a diferente altura respecto el nivel de mar. Por un lado estos aspectos dejan bastante bien posicionada esta alternativa, es una conexión directa y en la que la altura de agua sería muy elevada. La participación del embalse de Talarn es un aspecto a favor ya que como se ha dicho con anterioridad es el principal embalse regulador del Noguera Pallaresa, por delante del de Camarasa.

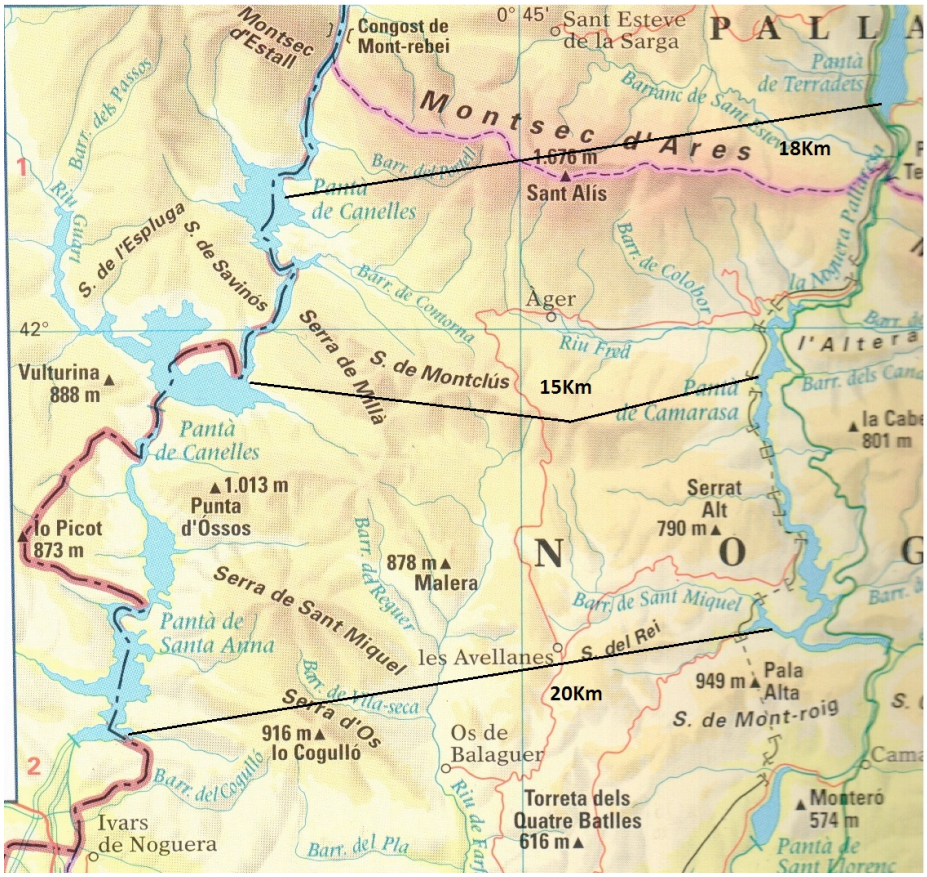
Por otro lado la capacidad de producción de la central hidroeléctrica del embalse de Sant Antoni, con un caudal de turbinación de $60m^3/s$, no es de las más elevadas en el Noguera Pallaresa, muestra de ello es que parte del caudal se desvía a una central cercana al embalse. Por este motivo si realmente nos decantamos por esta alternativa

quizás haya que llevar a cabo también la construcción de nuevas centrales para aumentar la potencia instalada y a su vez la producción.



Figura(25): Detalle del mapa físico de la zona noroeste de Cataluña. Fuente: Atlas geográfico de Cataluña.

En la Figura(26) vemos la parte sur de la zona de estudio, donde se muestran las tres conexiones restantes. Empezando por la parte superior del mapa la conexión observada es entre el embalse de Canelles y el de Terradets, es de características similares a la explicada anteriormente. La distancia que separa ambos embalses es ligeramente inferior, de unos 18km, pudiendo conseguir una altura de agua para turbinar de 1.100m gracias al "Montsec d'Ares". Un hecho a favor de esta conexión respecto la anterior es que el embalse de Canelles es muy grande y se podría trasvasar más cantidad de agua y tendríamos más capacidad de actuar en la regulación del Noguera Ribagorzana. Como en la anterior alternativa, también sería necesario nuevas centrales hidroeléctricas, en este caso no por problemas de potencia instalada, sino porque las actuales están a una distancia bastante superior, complicando así la conexión. El principal problema reside en que el embalse de Terradets aún estando lleno durante la mayor parte del año, tiene una capacidad de almacenamiento muy reducida con lo que la cantidad de agua disponible para el aprovechamiento reversible será menor y además es un embalse que provoca un efecto prácticamente nulo en el conjunto del Noguera Pallaresa en términos de regulación. Debido a la gran diferencia en las características de los embalses y a los problemas que se acaban de exponer, podemos concluir que aun presentando unas buenas características topográficas, esta alternativa nos restaría capacidad de actuación en el Noguera Pallaresa, limitando demasiado el uso del aprovechamiento reversible sin llegar a la solución de todos las necesidades que se puedan presentar.



Figura(26): Detalle del mapa físico de la zona centro-oeste de Cataluña. Fuente: Atlas geográfico de Cataluña.

Continuando con la conexión entre el embalse de Canelles con el de Camarasa, en este caso, la distancia que los separa es aún menor que en los casos anteriores, alrededor de 15km. Es cierto que a esta altura de los cursos de los ríos, la topografía que los separa es un tanto irregular con algunos valles entre medio, no hay una cadena montañosa situada entre estos dos embalses que sea tan alta como las anteriores, la única posibilidad pasaría por la Sierra de Montclús, que solo nos permitiría alcanzar un desnivel de 450m aproximadamente, un número significativamente menor respecto las conexiones anteriores pero que sería suficiente para la construcción de un aprovechamiento de este tipo. Aunque de esta manera conseguiríamos implicar en el aprovechamiento las dos centrales con más potencia instalada de cada río, estas distan demasiado con lo que también sería necesario nuevas centrales que no estuvieran a pie de presa, con tal de que la separación fuera tan solo de 15km. Además, ésta es la única alternativa que involucra un embalse regulador de cada río, permitiéndonos así una mayor explotación de la central hidroeléctrica de bombeo, solventando con más facilidad, tanto las necesidades de ajustar la demanda de electricidad como de trasvasar agua al Noguera Ribagorzana por temas de almacenamiento y devolverla al Noguera Pallaresa para paliar las exigencias del regadío de la gran cantidad de cultivos.

Para finalizar con este apartado queda comentar la posible comunicación de los embalses de Santa Ana y de Camarasa. En esta situación estaríamos conectando embalses de características parecidas tanto en términos de capacidad como en las características de la central y la distancia que deberíamos salvar en esta alternativa sería de 20km. El inconveniente de esta conexión es la topografía que hay entre ambos embalses, sería necesario bombear el agua dos veces para salvar los desniveles de las

Sierras de Os y de Mont-Roig y la energía potencial que adquiriría el agua sería la respectiva a unos 900m lo que nos dejaría con un desnivel de 500m aproximadamente. A este hecho hay que sumarle que son los últimos embalses que encontramos en los ríos con lo cual el agua que se podría trasvasar del Noguera Pallaresa al Noguera Ribagorzana solo se utilizaría en un salto hidráulico. Es la alternativa que presenta mayor distancia, la topografía es irregular y los embalses no son los más importantes de cada río, si a estos hechos le añadimos que la alternativa anterior, entre Canelles y Camarasa presenta mejores condiciones y que los embalses de Canelles y Santa Ana están uno a continuación del otro, parece lógico descartar esta última alternativa a favor de la planteada anteriormente.

Así pues, una vez analizadas las diversas opciones, vemos que claramente podemos descartar las conexiones de Canelles-Terradets y Santa Ana-Camarasa. De la misma manera queda constancia que las alternativas restantes son las mejores posicionadas tanto en temas de características de los embalse como de la topografía del terreno, aunque hay ciertos aspectos que nos hacen decantarnos definitivamente por la conexión entre Canelles y Camarasa. Esta presenta una longitud significativamente menor, los embalses tienen más capacidad de almacenamiento y regulación, la altura de agua conseguida es similar a la de las demás centrales de este estilo y el terreno donde situaremos el embalse superior del aprovechamiento hidroeléctrico reversible es a priori menos escarpado ya que es de menor altura y nos puede dar más opciones en las que situarlo.

Una vez elegido que la conexión que se va a realizar es la de Canelles-Camarasa, el siguiente paso es buscar el emplazamiento idóneo del embalse superior para ello definiremos las características de la conexión con tal de saber el tamaño aproximado que debería tener el embalse.

4- Solución propuesta

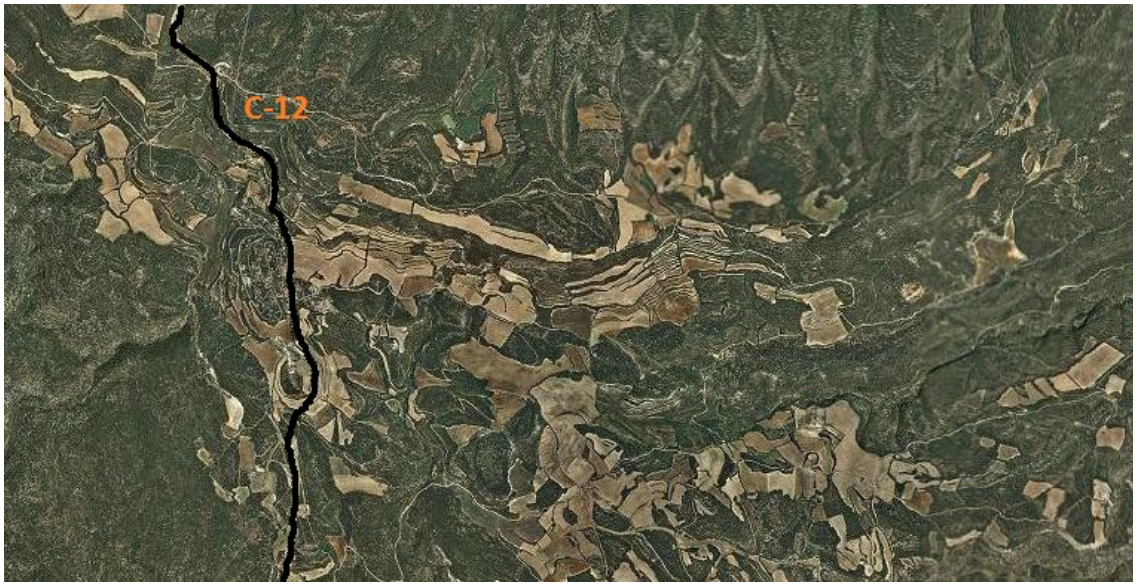
4.1- Situación del embalse superior

En este apartado se procede a observar con más detalle las sierras existentes entre los embalses con tal de encontrar una localización acertada para el embalse superior. Este embalse tendrá una capacidad de alrededor de $3hm^3$ ocupando una área de 30ha aproximadamente lo que daría lugar a una profundidad de 10m, de manera similar a las otras centrales hidroeléctricas de bombeo como por ejemplo la de Moralets o Gento-Sallente. Esta capacidad es aproximadamente el caudal que es capaz de bombear una central de este estilo durante un fin de semana, que son los días en los que el consumo de energía es menor debido a la inactividad de gran parte de la industria, y es cuando normalmente estas centrales disponen de excedente de energía durante más tiempo para bombear agua que después podremos utilizar durante los picos de demanda. También se considera un volumen reservado para la sedimentación que pueda ocurrir a lo largo del tiempo. Se ha fijado un caudal de diseño de $10m^3/s$ (se ha cogido como referencia el caudal del aprovechamiento de Moralets) y para alcanzar una velocidad del agua de 2m/s es necesario disponer de una canalización de 2,5m de diámetro.

Figura(27): Detalle de la topografía entre Canelles y Camarasa. Fuente: ICGC.

En la Figura(27) extraída del "Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya" (ICGC) se observa la existencia de dos sierras, la Sierra de Millà y la Sierra de Montclús que se encuentran prácticamente juntas. Por lo general el territorio no es abrupto, todos los puntos tienen una altura similar cercana a los 900m respecto el nivel del mar. Este hecho nos será útil para construir el embalse ya que necesitaremos un terreno regular y de fácil acceso.

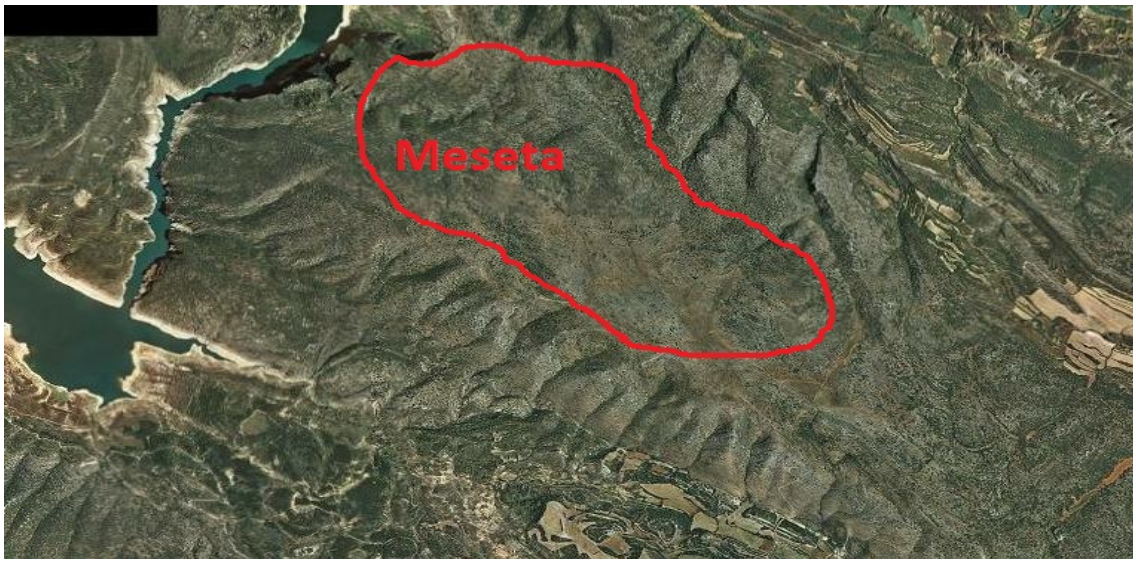
En la zona cercana a la carretera comarcal que pasa a través de la sierra encontramos bastantes terrenos que han sido convertidos en campos de cultivo como se puede apreciar en la Figura(28). Por este motivo intentaremos, si es posible, alejarnos un poco para construir el embalse, de manera que no afecte tanto a la actividad agrícola de esta zona.



Figura(28): Ortofoto de la zona circundante a la carretera C-12. Fuente: Elaboración propia con imagen extraída del ICGC.

Si situamos el embalse superior cerca de uno de los dos ríos, nos permitirá llevar a cabo el proyecto en dos fases, primero crear una central hidráulica de bombeo para el embalse más cercano con una rápida puesta en marcha y funcionamiento, de manera que ésta se podría aprovechar para generar energía mientras se termina la segunda fase que sería crear la conexión con el otro río que permitiría el trasvase de agua.

Estudiando el territorio nos damos cuenta que en las cercanías del embalse de Canelles (Figura(29)) encontramos una meseta en la Sierra de Millà, este tipo de terreno podría ser perfecto para instalar el embalse superior del proyecto. Es un terreno regular muy próximo al embalse de Canelles, con ello se podría establecer una conexión sencilla y directa con este embalse. Además se encuentra a cotas bastantes altas, superiores a 900m lo que nos permitiría alcanzar un desnivel de entre 400 y 500 metros con respecto el embalse, estableciendo así un aprovechamiento hidroeléctrico reversible de características parecidas a los ya existentes en Cataluña.

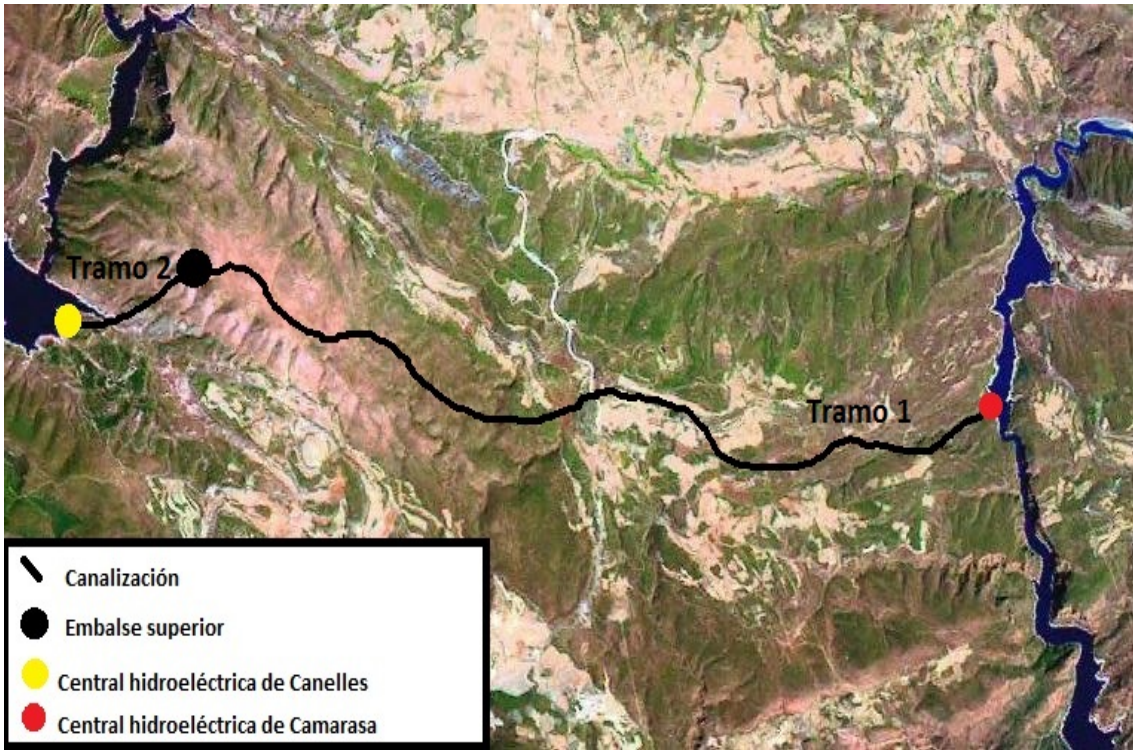


Figura(29): Meseta de la Sierra de Millà. Fuente: Elaboración propia con imagen extraída del ICGC.

El funcionamiento del aprovechamiento reversible consistiría en bombear agua desde el embalse de Camarasa durante las horas valle, almacenarla en el embalse superior y turbinarla durante las horas punta de demanda al embalse de Canelles. Por otro lado, cuando las demandas de regadío así lo requieran, se bombeará agua desde el embalse de Canelles para llevarla de nuevo al Noguera Pallaresa. Si escogemos esta situación, al estar tan cerca del embalse de Canelles la energía que se consume durante las horas punta de demanda para turbinar el agua sería menor que si situamos el embalse superior más alejado como sería el caso de la zona central anteriormente descrita.

En el territorio próximo al embalse de Camarasa la situación es un tanto más complicada, aunque existe alguna zona donde se podría llegar a construir el embalse superior, el terreno no es tan regular. Además, debido al uso y funcionamiento del aprovechamiento reversible, resulta más productivo que la obra se realice cerca del embalse de Canelles. Si fuera al contrario, el tramo y la energía para bombear el agua desde el embalse de Camarasa durante las horas valle sería menor que la energía necesaria para enviar el agua al embalse de Canelles en las horas punta de demanda, consumiendo así más energía cuando ésta es más cara.

En la Figura(30) se presenta la solución escogida para nuestro proyecto. Debido a un terreno claramente favorable y teniendo en cuenta los objetivos del proyecto se ha decido que situar el embalse superior en la meseta de la Sierra de Millà es la mejor solución que se puede adoptar. Para escoger el recorrido del Tramo1 buscamos que la canalización tenga una fuerte pendiente al inicio para alcanzar las máximas cotas en poca longitud y conseguir que el resto del tramo sea prácticamente llano, por eso iniciamos la canalización a través del Barranco de Montclús, logrando alcanzar cotas cercanas a los 900m. Así pues, el agua bombeada desde Camarasa recorrería el Tramo1 para ser almacenada en el embalse superior y posteriormente turbinarla a la central de Canelles.



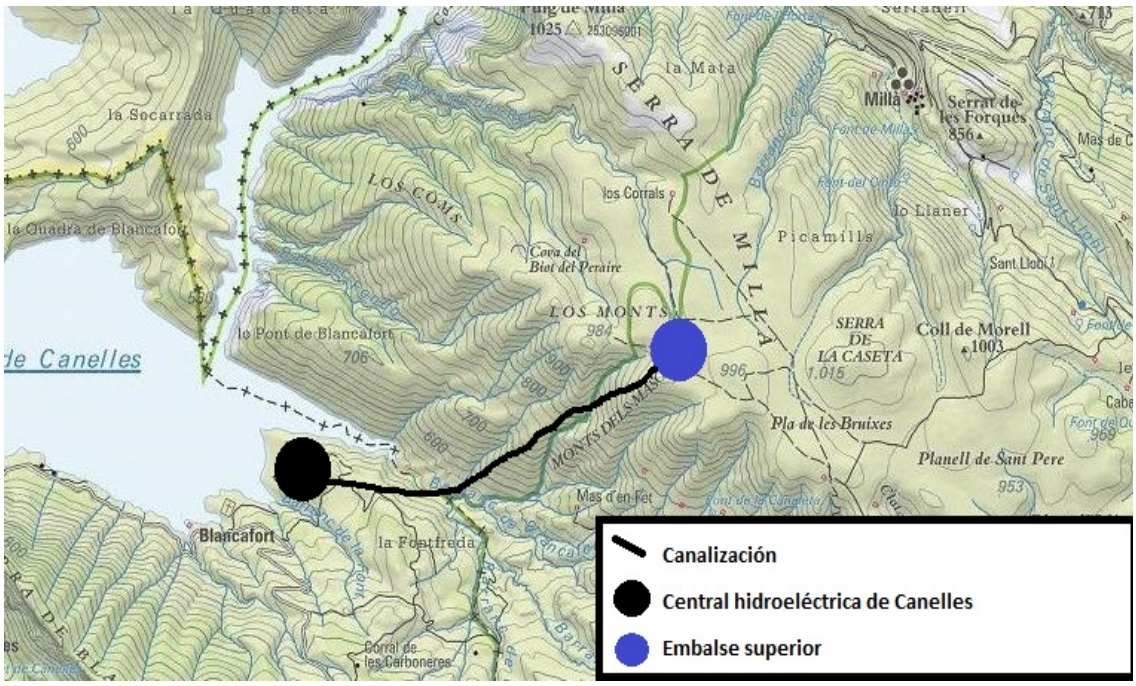
Figura(30): Planteamiento de la solución seleccionada. Fuente: Elaboración propia con imagen extraída del ICGC.

4.2- Fases constructivas del proyecto

La solución adoptada en el apartado anterior nos permite dividir el proyecto constructivo en dos fases. Éstas son independientes la una de la otra, se pueden llevar a cabo de forma paralela o con un desfase temporal. Para la primera fase incluso se podría intentar buscar financiación privada por parte de alguna empresa debido al beneficio económico. De esta forma podemos disminuir la participación de los fondos públicos en el proyecto, favoreciendo el papel de la administración y facilitando que se realice la construcción de este aprovechamiento reversible, que resultaría beneficioso para todas las partes implicadas.

La primera fase consistiría en la construcción de la central hidroeléctrica del embalse de Canelles y el embalse superior. La distancia es considerablemente reducida comparada con la que se tiene que salvar para realizar la conexión con el embalse de Camarasa, y una vez realizada se podría empezar la explotación de la central independientemente del desarrollo de la otra fase. Este hecho podría ser del interés de la empresa privada encargada de gestionar la generación de energía hidroeléctrica, Endesa en nuestro caso, ya que no haría falta esperar a finalizar toda la canalización para poder empezar a sacar provecho del proyecto, facilitando así la aprobación y consentimiento por su parte.

A continuación en la Figura(31) se presenta un esquema de la primera fase constructiva, donde se determina la posición de cada uno de los elementos mediante la ayuda de un mapa topográfico. Se comprueba también, que el salto de agua que se consigue es de 500m.

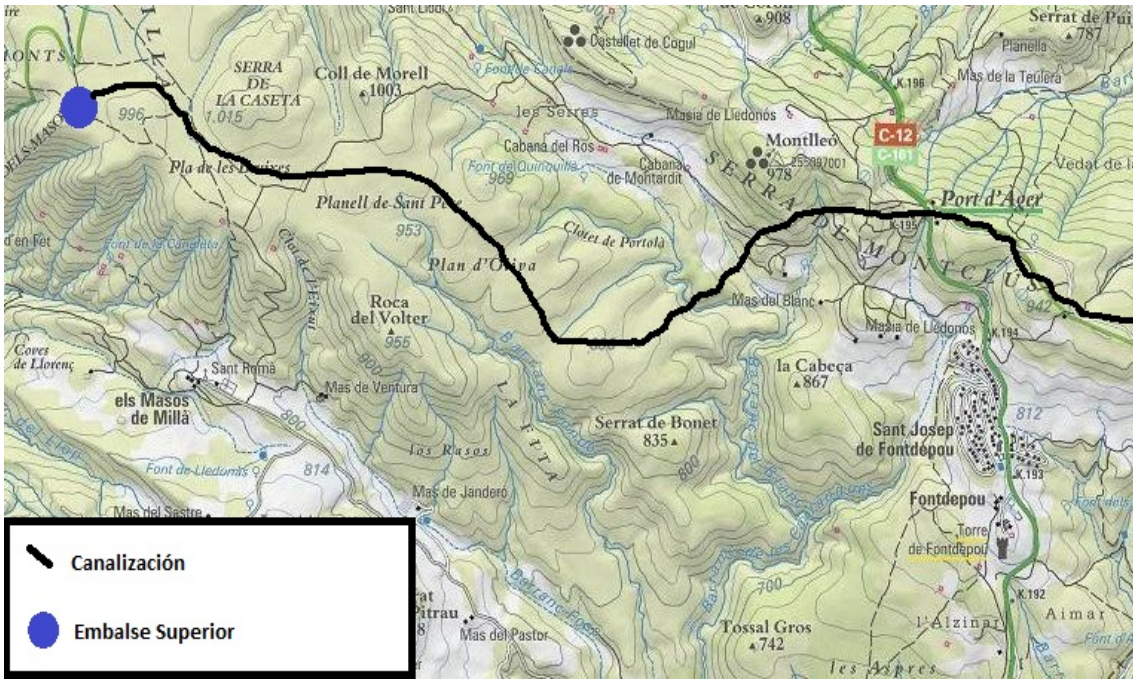


Figura(31): Descripción de la primera fase. Fuente: Elaboración propia con imagen extraída del ICGC.

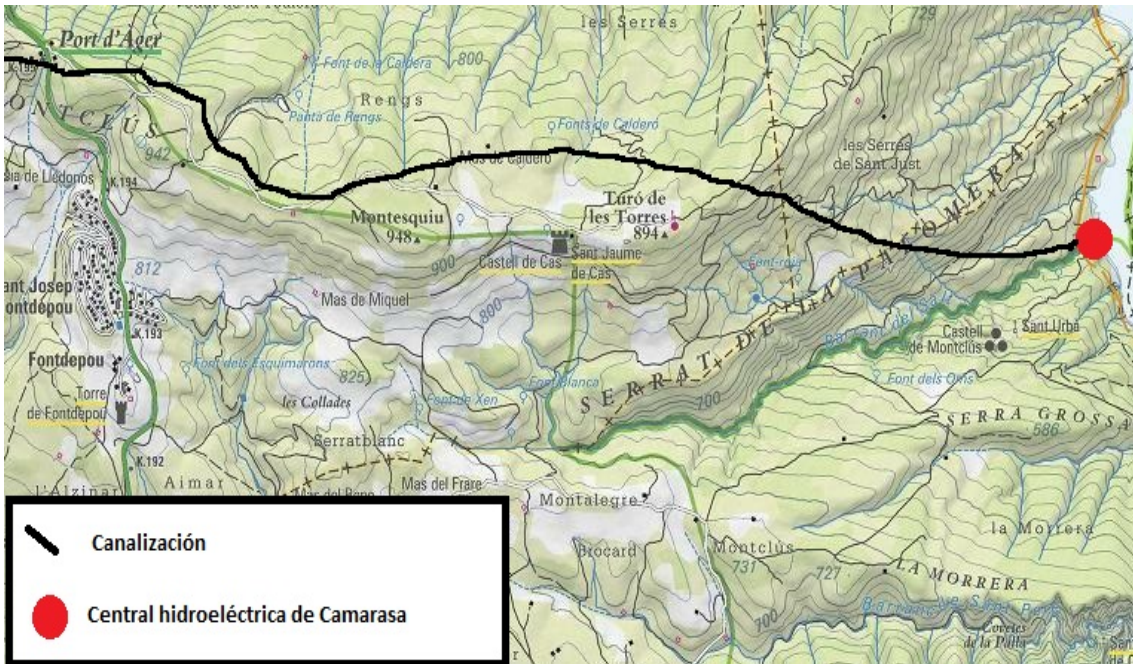
Por otro lado, la segunda fase constaría de la construcción de la central hidroeléctrica del embalse de Camarasa y de la canalización del agua hasta el embalse superior, completando así el proyecto inicial diseñado. En este aspecto el más interesado sería la administración, pues sin este tramo no se logran satisfacer ninguna de las necesidades planteadas a lo largo del estudio. Es esta segunda fase la que posibilita el trasvase de agua y el retorno de la misma, de lo contrario los propietarios de los campos de cultivo

no verían con buenos ojos el proyecto ya que saldrían perdiendo al disponer de menos agua para sus campos al realizar el trasvase. Es la administración quien se debe encargar de hacer lo posible para paliar las necesidades sociales ya que no es factible buscar inversiones por parte de una empresa privada, pues esta no sacaría beneficio alguno de esta conexión.

En las Figura(32) y (33) se introduce un esquema de la segunda fase constructiva donde se muestra la situación de la central de Camarasa y el trazado de la canalización acorde con las líneas de cota del terreno. Consiguiendo un recorrido prácticamente llano desde el embalse superior hasta la zona cercana al "Turó de les Torres", donde empieza un descenso significativo hasta la central del embalse de Camarasa.



Figura(32): Descripción de la segunda fase. Fuente: Elaboración propia con imagen extraída del ICGC.



Figura(33): Descripción de la segunda fase. Fuente: Elaboración propia con imagen extraída del ICGC.

5- Conclusiones

El objetivo principal del proyecto es proponer una solución a los problemas de generación de energía y demanda de agua que encontramos a lo largo del curso del Noguera Pallaresa y el Noguera Ribagorzana, así como comprobar su viabilidad. Para ello, en primer lugar se ha realizado un estudio de energía. Donde se observa la evolución de las diferentes fuentes de energía con tal de presentar los problemas en la generación de electricidad, introduciendo el hándicap de la irregularidad eólica y particularizándolo para el caso de Cataluña. Concluyendo que la mejor manera de solucionarlo es con el uso de centrales hidroeléctricas de bombeo. A posteriori, el estudio del terreno nos ha permitido escoger la mejor situación para llevar a cabo la construcción de la central hidroeléctrica de bombeo y presentar el diseño de una solución. La conclusión a la que se ha llegado es que, en el contexto expuesto en los apartados anteriores, la mejor solución es la construcción de un aprovechamiento hidroeléctrico reversible que conecta los ríos Noguera Pallaresa y Noguera Ribagorzana a la atura de los embalses de Canelles y Camarasa, con un embalse superior de $3hm^3$, y una canalización con una tubería de 2,5m de diámetro que nos permite trabajar con un caudal de diseño de $10m^3/s$.

Actualmente España tiene una gran dependencia energética exterior debido a la falta de recursos como el petróleo o el carbón y la única forma de disminuirla es potenciando energías como la eólica, la solar y la hidráulica. A lo largo del estudio de energía se ha intentado exponer la necesidad de llevar a cabo actuaciones en el sector de la energía hidroeléctrica, para poder llegar a una mejor regulación de la red eléctrica española. Debido a las características de la demanda y producción de energía, con la posibilidad que nos ofrece la fuente hidroeléctrica de poder alcanzar un mayor equilibrio y constancia en ambas curvas, podemos concluir, que efectivamente la energía hidroeléctrica es una de las claves para aumentar la efectividad de nuestra red.

Se ha visto en los apartados 2.3 y 2.5 como en los últimos años las energías de fuentes renovables están experimentando un importante desarrollo en términos de potencia instalada y producción tanto en Cataluña como en el resto de España, en especial la energía eólica. Los objetivos del gobierno en cuanto a la evolución de estas fuentes cada vez serán más ambiciosos hasta el punto que lleguen a dominar en un futuro la producción de energía eléctrica. El único inconveniente para una mayor participación en el mix eléctrico es la notable irregularidad de la energía eólica, hecho que se constata en el apartado 1.4, y que nos impide depender de ella. Es aquí donde surge la necesidad de compensar el desequilibrio entre producción y demanda y donde entra en juego la energía hidroeléctrica mediante los aprovechamientos reversibles, que son la única forma de "almacenar" la energía sobrante y por ello nos decantamos por una solución de este estilo. Ésta es la única fuente hoy en día que puede complementar perfectamente a la eólica, logrando convertir el problema de la irregularidad en un beneficio para la red eléctrica. Este hecho también afecta al resto de energías, sobre todo a las convencionales, ya que al homogeneizar la demanda, permite que centrales como las nucleares o térmicas trabajen con una producción constante durante todo el día, favoreciendo su funcionamiento y efectividad.

Es acertado intentar mejorar el sistema de generación de energía hidroeléctrica en los Nogueras, pues es principalmente el lugar donde se encuentra instalado el potencial de esta fuente de energía en Cataluña. Observando los ríos queda reflejada una pobre

regulación de ambos debido a diferencias sustanciales en términos de caudal y volumen de almacenamiento de agua y conectando ambos ríos conseguimos una mayor regulación de este sistema, permitiéndonos aprovechar los recursos naturales de las cuencas de manera más eficaz.

Es fundamental que la conexión involucre los principales embalses reguladores de los ríos, obteniendo así un mayor rango de actuación y más facilidad para afectar al conjunto de los Nogueras. Igual de importante es conseguir un salto de agua suficiente para que el aprovechamiento reversible funcione con normalidad y seamos capaces de sacarle el máximo rendimiento a la obra. El único lugar donde se cumplían simultáneamente estas condiciones es a la altura de los embalses de Canelles y Camarasa donde el terreno tiene unas características prácticamente inmejorables permitiendo alcanzar una altura considerable en poca distancia y logrando que el resto de la conexión sea prácticamente llana, de manera que nos permite ahorrar energía a la hora de hacer el trasvase de agua.

Como se ha demostrado en el apartado 3.1 gran parte del agua del Noguera Pallaresa se destina al regadío de los campos cercanos, sobretodo al sur de su desembocadura en el Segre. Para incrementar la regulación de los ríos con tal de generar energía hidroeléctrica el trasvase de agua solo sería necesario en sentido Pallaresa-Ribagorzana, pero si solo fuera así este proyecto no tendría aceptación social por parte de los propietarios de los terrenos de regadío, ya que disminuiría la cantidad de agua disponible para regar. Este factor es un muy importante, y también se ha tenido en cuenta a la hora de plantear el esquema del aprovechamiento reversible, pues éste permite realizar la operación de trasvase en sentido contrario cuando la demanda de regadío así lo requiera.

Se he intentado presentar una solución de características similares a las otras centrales de este tipo que ya están en funcionamiento. Con este estudio queda clara la viabilidad de instalar una conexión entre los dos Nogueras, son muchos los aspectos positivos y además el esquema propuesto facilita su construcción, involucrando diferentes organismos interesados en que se lleve a cabo. Las dos fases constructivas en que se puede dividir permiten una mayor adaptación a las exigencias de Endesa y de la administración, pudiendo establecer una colaboración que resultará positiva para ambas partes.

En conclusión, creemos que este es un proyecto que puede resultar beneficioso para las diferentes entidades implicadas, logrando satisfacer todas las necesidades sociales planteadas. Por un lado, la empresa gestora de la actividad hidroeléctrica sacará más partido de su producción y la curvas de demanda y generación de energía eléctrica tenderán a equilibrarse. Por otro lado, la administración logrará incrementar la regulación del sistema Pallaresa-Ribagorzana, consiguiendo aprovechar la capacidad de los embalses ya existentes en ambos ríos y solucionar cualquier problema de demanda de agua que se pueda presentar tanto en la cuenca del Noguera Pallaresa como en la del Noguera Ribagorzana. Los aspectos ambientales y económicos del proyecto no se han tenido en cuenta en este estudio, para saber si son relevantes se debería realizar un estudio más a fondo del terreno por donde pasará la canalización y optimizar las dimensiones del diseño para minimizar el coste de la obra obteniendo un buen rendimiento, pero no se ha considerado objeto de este estudio de viabilidad.

Como reflexión final, tan solo decir, que los proyectos como un aprovechamiento hidroeléctrico reversible son importantes para seguir apostando por la energías renovables y aunque son obras que necesitan unas características determinadas del terreno y no se pueden establecer en cualquier lugar, merece la pena estudiar bien las posibilidades y continuar invirtiendo en ellas. A parte de las numerosas ventajas nombradas a lo largo del estudio, otro aval más son las centrales hidráulicas de bombeo que ya están construidas, en las que se puede comprobar su excelente funcionamiento y rendimiento. Si de verdad queremos una mayor participación de las fuentes energéticas renovables y aprovechar los recursos propios con tal de disminuir la dependencia energética exterior, construcciones de este estilo son un buen comienzo y está en nuestras manos conseguirlo.

6- Bibliografía consultada

Libros:

- DOLZ, Josep; ARMENGOL, Joan. "*Els recursos hídrics a Catalunya, dades i conceptes bàsics*". Barcelona: Cambra de comerç de Barcelona, 2011.

- IDAE y APIA. "*Manuales de energías renovables nº6: Minicentrales hidroeléctricas"*. Madrid: Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2006.

- Institut Cartogràfic Llatí. "*Atles geogràfic de Catalunya i del Món*". Barcelona: Vicens Vives, 2000.

Documentos:

- Agencia Catalana del Aigua. "*Plan de gestión del distrito de la cuenca fluvial de Cataluña 2010-2015*". Barcelona: Generalitat Catalana, 2010.

- CHE. "*Plan hidrológico de la cuenca del Ebro: Documento resumen*". Consejo del agua de la demarcación del Ebro, 2013.

- CHE. "*Parte diario de embalses 15-04-2014*". Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014

- IDAE. "*Plan de acción nacional de energías renovables 2011-2020*". Madrid: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010

- IDAE. "*Plan de energías renovables 2011-2020*". Madrid: Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2011.

Artículos:

- "Las energías renovables cubrirán el 20,8% del consumo de energía en España en el año 2020". *Clima noticias* [en línea], 2011, nº182, p. 28-30. Disponible en: http://www.grupottv.es/publicacion/noticias/dd5bfd2a387986c87ba30965539a9750.pdf

- RÜHL, Christof. "La energía en 2012, adaptarse a un mundo cambiante". *BP, Statistical Review of World Energy,* Londres, 2013.

Blogs:

- RABAT, S.Sánchez. "Las "ventajas" de la energía eólica". *Cambio Climático, energía* [blog]. [2010]. Disponible en: http://cambioclimaticoenergia.blogspot.com.es/2010/05/las-ventajas-de-la-energia-eolica.html

Webs:

Red Eléctrica Española:

http://www.ree.es/es/actividades/balance-diario

http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2013/12/la-demanda-de-energia-electrica-desciende-un-2-1-en-2013

Confederación Hidrográfica del Ebro:

http://www.chebro.es/

http://ramonycajal.mail.chebro.org/saihebro/index.php?url=/previsiones/mapas/tipoestacion:M/mapa:HG

http://www.chebro.es:81/Plan%20Hidrologico%20Ebro%202010-2015/

Institut català de la Energía:

http://www20.gencat.cat/portal/site/icaen

http://www15.gencat.cat/icaen_prd_elec/AppJava/inici.do;jsessionid=17DF71A59EEED95D09085F9ED31E1A45.jvm1

Ministerio de Industria, Energía y Turismo:

http://www.minetur.gob.es

http://www.minetur.gob.es/energia/nuclear/centrales/espana/paginas/centralesespana.aspx

Institut Cartogràfic i Geológic de Catalunya:

http://www.icc.cat/vissir3/

Institut d'Estadística de Catalunya:

http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=501&lang=es&t=2009&x=9&y=9

UNESA:

http://www.unesa.es/sector-electrico

http://www.unesa.net/unesa/unesa/electricidad/ficha2_7.html

http://www.unesa.net/unesa/html/sabereinvestigar/mapas/centraleshidroelectricas.htm

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía:

http://www.idae.es/

http://www.idae.es/index.php/id.155/mod.noticias/mem.detalle

Otras webs consultadas:

http://www.heraldo.es/noticias/aragon/endesa_esta_tramitando_gran_salto_hidroelectrico_reversible_mequinenza.html

http://www.embalses.net/cuenca-5-ebro.html