

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA GENERADA EN LA MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE ANGUIANO



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Nerea Arriazu Ramos

José Javier López Rodríguez

Pamplona, 13 de Junio de 2019 (a constatar con el
Departamento de Ingeniería)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco haber tenido la oportunidad de desarrollar este trabajo de fin de carrera en contribución con mi tutor de prácticas de Iberdrola, Tomás Caballero Martínez.

Finalmente, agradezco a mi tutor de la Universidad Pública de Navarra, José Javier López Rodríguez, por brindarme toda su ayuda y su tiempo.

DEDICATORIAS

A mi familia por apoyarme durante toda la carrera y en especial a mi hermana Ainhoa por su ayuda en esta última etapa y siempre.

PALABRAS CLAVE

- Minicentral hidroeléctrica de Anguiano
- Curva de caudales
- Potencia hidroeléctrica
- Producción hidroeléctrica
- Aforador río Najerilla

RESUMEN

La producción de electricidad en minicentrales hidroeléctricas está directamente relacionada con el caudal que circula por el canal o río que las alimenta. No obstante, además de la disponibilidad del recurso, hay otros factores, como el buen mantenimiento de la acometida, el estado de las turbinas, o las propias estrategias de gestión del recurso disponible, que determinan la producción eléctrica final.

El objetivo del TFG se ha centrado en analizar la relación entre el caudal del río Najerilla y la potencia eléctrica generada por la minicentral de Anguiano, a partir de datos históricos, con el fin de caracterizarla en un modelo que haga más eficiente la operación de las minicentrales.

Gracias a la caracterización hidrológica se han obtenido conclusiones relevantes sobre el río Najerilla que afectan directamente a la minicentral de Anguiano, viéndose especialmente necesaria la determinación de una actuación eficiente para obtener la máxima producción posible para caudales bajos.

KEY WORDS

- Mini-hydroelectric power station of Anguiano
- Flow curve
- Hydroelectric power
- Hydroelectric production
- Najerilla river flowmeter

ABSTRACT

The production of electricity in mini hydroelectric power stations is directly related to the flow that circulates through the channel or river that feeds them. However, in addition to the availability of the resource, there are other factors, such as the good maintenance of the connection, the condition of the turbines, or the management strategies of the available resource, which determine the final electrical production.

The objective of the final degree project has focused on analyzing the relationship between the Najerilla river flow and the electric power generated by the Anguiano mini-power plant, based on historical data, in order to characterize it in a model that makes more efficient the operation of the mini-stations.

Due to the hydrological characterization, relevant conclusions have been obtained about the Najerilla river that directly affect the Anguiano mini-power plant. It is especially necessary to determine an efficient action to obtain the maximum possible production for low flows.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objeto del proyecto	1
1.2.	Objetivos del proyecto	1
2.	SITUACIÓN ACTUAL	2
2.1.	Contexto europeo	2
2.2.	Contexto nacional.....	3
3.	MINICENTRALES HIDRÁULICAS	5
3.1.	Clasificación de las centrales hidroeléctricas según la potencia instalada.....	5
3.2.	Componentes principales de una instalación hidroeléctrica.....	5
3.3.	Esquema general de un salto de agua.....	7
3.4.	Turbina hidráulica	8
3.5.	Multiplicadora	13
3.6.	Generador eléctrico	13
4.	DESCRIPCIÓN DEL EMPLEZAMIENTO	15
4.1.	Río Najerilla	15
4.1.1.	Localización del río Najerilla.....	15
4.1.1.	Descripción del río Najerilla.....	16
4.2.	Minicentral de Anguiano	17
4.3.	Esquemas de instalaciones del río Najerilla.....	19
4.4.	Descripción de la instalación	19
4.4.1.	Azud	21
4.4.2.	Canal.....	23
4.4.3.	Depósito de extremidad o cámara de carga	23
4.4.4.	Tuberías forzadas	25
4.4.5.	Central.....	27
5.	ESTUDIO DE LA FRECUENCIA DE CAUDALES DEL RÍO	29
5.1.	Descripción de la serie de datos	29
5.2.	Curvas de caudales clasificados	31
5.3.	Curvas de probabilidad.....	34
5.4.	Análisis estadístico de Weibull	36
5.4.1.	Fundamento teórico	36
5.4.2.	Función distribución de Weibull.....	37
5.4.3.	Cálculo de los parámetros de Weibull.....	38
5.4.4.	Bondad del ajuste por mínimos cuadrados.....	39

5.4.5. Ajuste de la Función de Weibull a los datos de caudal de Anguiano	40
6. ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA	46
7. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN CUADAL-PRODUCCIÓN.....	47
8. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MINICENTRAL DE ANGUIANO	48
9. CONCLUSIONES	51
10. LÍNEAS FUTURAS	53
11. BIBLIOGRAFIA.....	54
ANEXOS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las centrales atendiendo a la potencia instalada.	5
Tabla 2. Clasificación de las turbinas hidráulicas.	9
Tabla 3. Valores del salto de Anguiano.	20
Tabla 4. Datos de la presa.....	22
Tabla 5. Datos del canal.	23
Tabla 6. Datos de la cámara de carga.....	24
Tabla 7. Datos de las tuberías.	27
Tabla 8. Datos de las turbinas y los alternadores.....	28
Tabla 9. Tipo de año atendiendo al caudal en el aforador de Anguiano.	33
Tabla 10. Caudales característicos del año medio.	33
Tabla 11. Condiciones óptimas para el mejor reparto del caudal.	36
Tabla 12. Caudales más significativos del régimen normal de flujo de río (Curva del 50% de ocurrencia).....	36
Tabla 13. Comparación de los análisis de caudales significativos.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de energías renovables en el consumo final bruto de energía y los objetivos de 2020.....	2
Figura 2. Generación bruta de electricidad procedente de fuentes renovables, EU-28, 1990-2016.....	3
Figura 3. Estructura de potencia instalada en 2017.	3
Figura 4. Estructura de generación eléctrica en 2017.	4
Figura 5. Esquema general de los componentes de una instalación hidroeléctrica.	7
Figura 6. Esquema general de un salto de agua.	8
Figura 7. Accionamiento de una turbina Pelton.	10
Figura 8. Turbina Pelton.	10
Figura 9. Turbina Pelton.	10
Figura 10. Turbina Francis.....	11
Figura 11. Accionamiento turbina Kaplan.....	12
Figura 12. Turbina Kaplan.	12
Figura 13. Rango de funcionamiento de las turbinas hidráulicas.	12
Figura 14. Esquema de un generador síncrono.	14
Figura 15. Esquema de un generador asíncrono.	14
Figura 16. Ríos de la comunidad de La Rioja y localización de La Rioja en España.	15
Figura 17. Mapa cuenca del Ebro y cuenca del Najerilla.....	16
Figura 18. Centrales hidroeléctricas en funcionamiento y visión aérea de la central.	18
Figura 19. Esquema de la disposición de las instalaciones del río Najerilla hasta Arenzana.....	19
Figura 20. Esquema general del salto de agua de Anguiano.	20
Figura 21. Vista aérea del azud de Anguiano.....	21
Figura 22. Escala salmonera.	22
Figura 23. Vista cercana de la escala salmonera.	22
Figura 24. Desagüe de fondo.	22
Figura 25. Tramo del canal al descubierto.....	23
Figura 26. Salida del desagüe de fondo al canal con limpia rejas.....	23
Figura 27. Esquema de la cámara de carga.....	24
Figura 28. Compuertas para las tuberías forzadas y limpiarejas de la cámara de carga.	25
Figura 29. Compuertas del desagüe de fondo.....	25
Figura 30. Esquema del anillo de unión de las tuberías.	26
Figura 31. Bajada de las tuberías forzadas desde la cámara de carga hasta la central.	26
Figura 32. Derivaciones de la tubería a la entrada de la central.	26
Figura 33. Anillo de unión de las tuberías y válvula de partición.	27
Figura 34. Grupo turbina-alternador.	28
Figura 35. Visión en conjunto de los tres grupos turbina-alternador.	28
Figura 36. Esquema explicativo de la localización del aforador de Anguiano con respecto a la central.	29
Figura 37. Hidrogramas anuales.....	30
Figura 38. Hidrogramas anuales hasta 60 m ³ /s.....	30
Figura 39. Curvas de duración de caudales.	32
Figura 40. Curvas de probabilidad.....	35
Figura 41. Función de distribución para distintos valores de k.	38
Figura 42. Gráfica de la función de Weibull no acumulada.	41

Figura 43. Gráfica del segundo ajuste por mínimos cuadrados.	42
Figura 44. Comparación de la función acumulada no paramétrica de Weibull y la función de distribución para el segundo ajuste.	43
Figura 46. Comparación entre producciones anuales y aportaciones anuales.	46
Figura 47. Curvas de rendimiento de las turbinas en función del caudal.	49
<i>Figura 48. Curvas de rendimiento de las turbinas en función de la potencia.</i>	49
Figura 49. Región de funcionamiento de las turbinas hidráulicas.	50

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto del proyecto

De la apuesta por las energías renovables en la sociedad actual, surge la necesidad de hacer que la energía hidráulica sea lo más competitiva posible. Este proyecto trata de conocer exhaustivamente las instalaciones de las que se dispone para poder obtener su máximo potencial.

Hasta el momento, la observación diaria y experiencia de los oficiales encargados de las minicentrales hidráulicas, en las que se centra este proyecto, era el recurso principal para la explotación de las mismas. Sin embargo, surge la motivación de ir más allá y tratar de modelizar su comportamiento para una mayor comprensión y habilidad final en su explotación.

La experiencia sumada a la correlación entre potencia y caudales que se ha realizado ayudará en la operación y desarrollo diario de las minicentrales hidráulicas, tanto para conseguir el máximo aprovechamiento del recurso como para su mantenimiento.

1.2. Objetivos del proyecto

Los objetivos principales del presente trabajo son dos: el estudio de las **frecuencias de caudales del río Najerilla** y correlacionar este caudal con la producción de la **minicentral hidráulica de Anguiano (La Rioja)** instalada en dicho río y en propiedad de **Iberdrola Renovables, S.A.U.**

Cada estudio se ha desarrollado por separado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que ha sido necesario llevar ambos paralelamente para conseguir un análisis justificado de los aspectos más relevantes que se han presentado a lo largo del trabajo y poder así entenderlo debidamente.

En la primera parte del trabajo se ha desarrollado un estudio acerca de la frecuencia de caudales del río Najerilla en el que se encuentra instalada la minicentral. Esta primera parte ha ayudado a plantear la segunda ya que ha mostrado las nociones básicas acerca del comportamiento del río donde se encuentra la minicentral estudiada.

En la segunda parte, tras el análisis de los datos de caudal se ha correlacionado el mismo con la producción energética para observar las limitaciones de la instalación y las posibles mejoras a realizar para mejorar la explotación del recurso.

2. SITUACIÓN ACTUAL

Este capítulo se expone para contextualizar la posición actual de la energía hidráulica en el mercado energético tanto europeo como nacional.

2.1. Contexto europeo

La Unión Europea tiene como objetivo prioritario la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables. Esto se debe a razones de seguridad y diversificación del suministro de energía, de protección del medio ambiente y de cohesión económica y social.

La intención de la UE es lograr, entre otros objetivos, para el año 2020 que el 20 % del consumo final bruto de energía proceda de fuentes renovables; este objetivo se distribuye entre los Estados miembros de la UE con planes nacionales de acción diseñados para establecer una hoja de ruta para el desarrollo de las energías renovables en cada uno de los Estados miembros. La figura 1 muestra los datos sobre el porcentaje de energías renovables en el consumo final bruto de energía y los objetivos que se han fijado para 2020. El porcentaje de energías renovables en el consumo final bruto de energía fue del 17,0 % en la EU-28 en 2016, a diferencia del 8,5 % en 2004 [1].

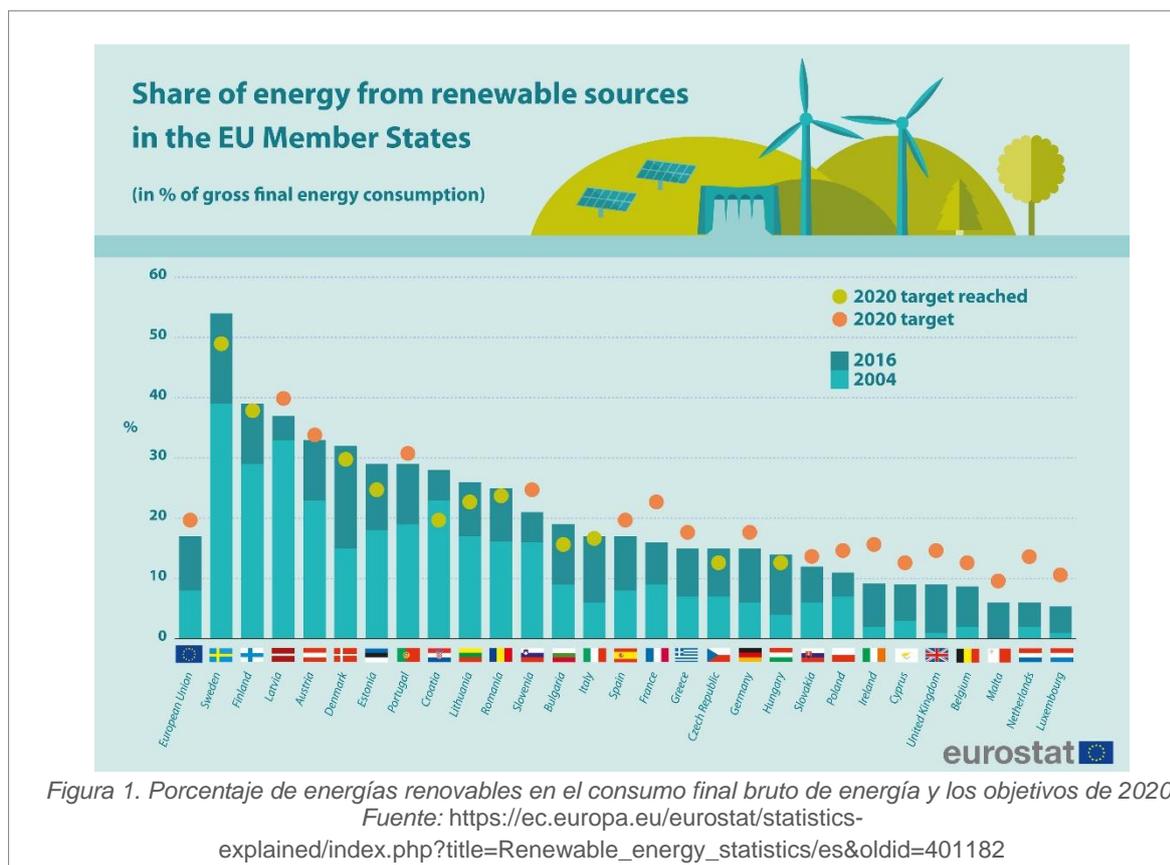
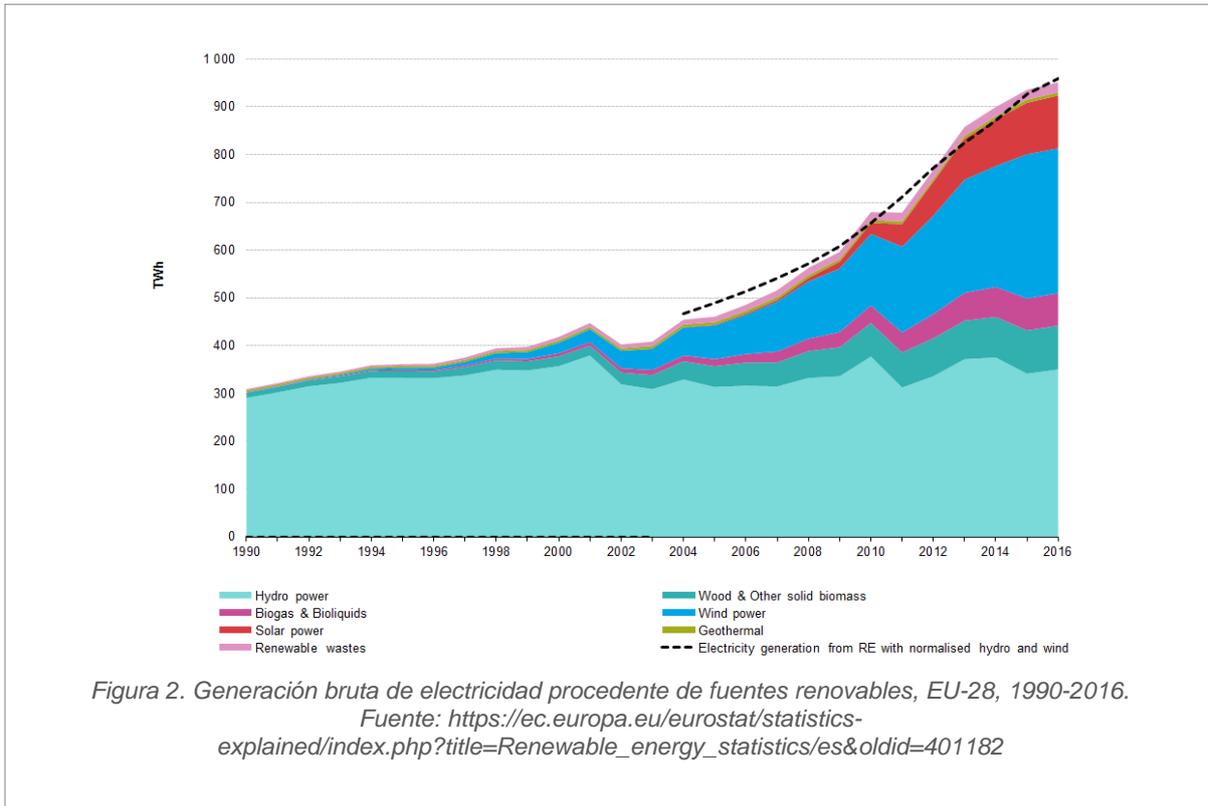


Figura 1. Porcentaje de energías renovables en el consumo final bruto de energía y los objetivos de 2020.

Fuente: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/es&oldid=401182)

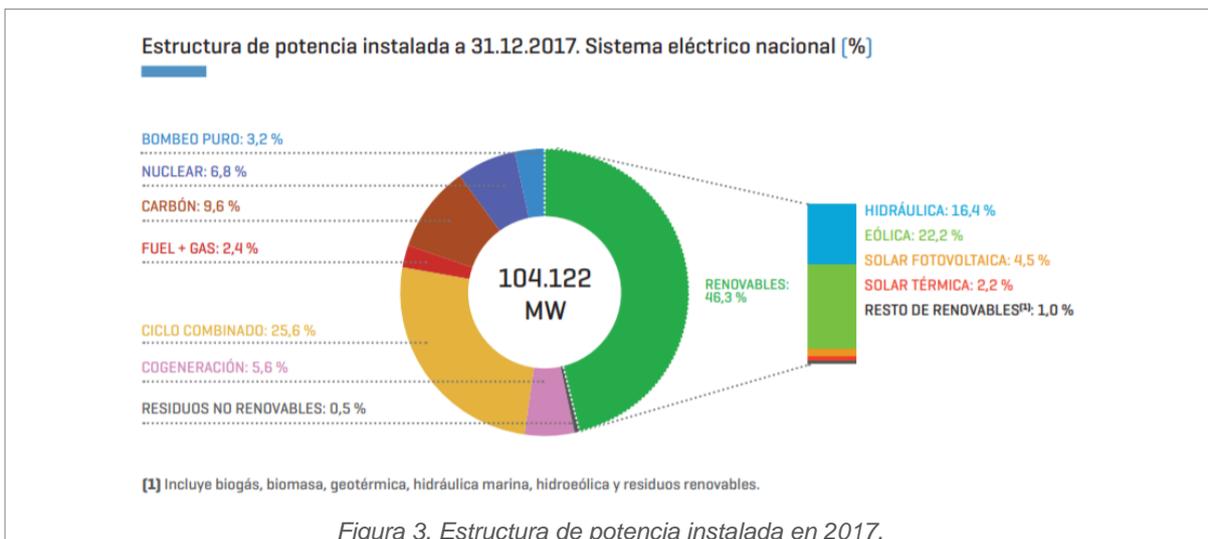
[explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/es&oldid=401182](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/es&oldid=401182)

Una de las apuestas para lograr estos objetivos es la energía hidráulica ya que mucha parte ya está instalada. En 2016 la energía hidroeléctrica fue la fuente más importante, seguida de cerca por la eólica (véase el figura 2).



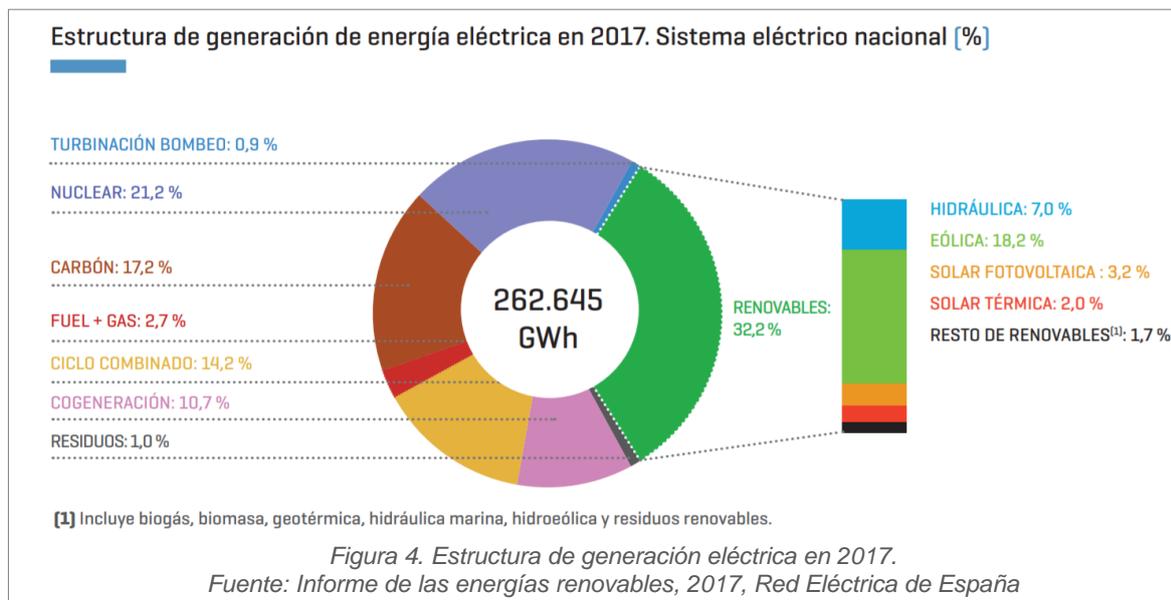
2.2. Contexto nacional

Como se ve en la figura 1 del apartado anterior España es uno de los países que debe mejorar para conseguir alcanzar los objetivos del 2020. Sin embargo, se van dando pasos hacia los objetivos europeos y en 2017 el porcentaje de potencia instalada renovable en España, tal y como se ve en la figura 3, es el siguiente [2]:



Fuente: Informe de las energías renovables, 2017, Red Eléctrica de España.

Además, en 2017 los datos generación en España fueron los siguientes:



Para alcanzar dichos objetivos hay que fomentar dos puntos de actuación: la instalación de más potencia renovable y la mejora en la explotación de las que ya existen. Este trabajo apoya el segundo punto de actuación desde la motivación de la implementación de un plan de seguimiento en minicentrales hidroeléctricas.

3. MINICENTRALES HIDRÁULICAS

Como paso previo al desarrollo del trabajo se ha visto conveniente introducir unos conceptos básicos relacionados con las minicentrales hidroeléctricas y la maquinaria de las mismas: turbinas y generadores.

Las centrales hidroeléctricas utilizan energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Por lo general, estas centrales aprovechan la energía potencial gravitatoria que posee una masa de agua de un cauce natural debido a un desnivel. En su caída entre dos niveles del cauce, se hace pasar el agua por una turbina hidráulica que transmite su energía a un generador eléctrico que la transformará en energía eléctrica.

3.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas según la potencia instalada

Existen diversos puntos de vista para la clasificación de las centrales hidroeléctricas. La clasificación en la que se ha centrado este estudio es en la potencia instalada, es decir, la potencia nominal de los grupos generadores instalados en la central.

TIPO DE CENTRAL	POTENCIA (MW)
Micro central	$P < 0.1$
Minicentral	$0.1 \leq P < 1$
Centrales de media potencia	$1 \leq P < 10$
Centrales de gran potencia	$P \geq 10$

Tabla 1. Clasificación de las centrales atendiendo a la potencia instalada.
Fuente: Elaboración propia

3.2. Componentes principales de una instalación hidroeléctrica

A continuación se van a exponer y explicar los principales componentes existentes en una instalación hidroeléctrica de agua fluuyente. Este tipo de centrales son aquellas en las que se desvía parte del agua del río mediante una toma, y a través de canales o conducciones se lleva hasta la central donde será turbinada. Una vez obtenida la energía eléctrica el agua desviada es devuelta nuevamente al cauce del río [3].

Presa o Azud:

El primer elemento que se encuentra en una central hidroeléctrica es la **presa o el azud**. Se encarga de desviar y laminar el río, es decir, remansar el agua. La principal diferencia entre ambas es el tamaño. Las presas se utilizan en instalaciones hidroeléctricas de gran tamaño mientras que el azud es típico de las minicentrales.

El principal objetivo del **azud** es crear un embalse artificial que eleve el nivel del río y quede garantizada la captación del caudal mínimo necesario para la operación de la central y la producción de energía eléctrica.

El azud se diseña para tener la posibilidad de que el agua rebose por encima. Por lo tanto, en el caso de que la acumulación de agua exceda la capacidad máxima del azud, saldrá por el **rebosadero**.

Todo azud debe disponer de una **escala de peces** también para cumplir con los requerimientos normativos y ecológicos. Se trata de un canal situado habitualmente en uno de los laterales. Se diseña con forma escalonada para mantener un caudal entre el azud y el canal de desagüe y asegurar que los peces que migran en el río puedan atravesar la presa.

La obligatoriedad de instalar una escala de peces aparece determinada en el siguiente real decreto: Según el "**Real Decreto 1/2016, de 8 de enero**, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro". En el **CAPÍTULO III: Regímenes de caudales ecológicos y otras demandas ambientales, artículo 9º** se determina: "En los nuevos aprovechamientos y en aquellos que así se acuerde mediante un proceso de concertación, cuya toma de agua se realice mediante una estructura transversal en el cauce, deberán circular, al menos, una parte de los caudales ecológicos por una escala de peces o dispositivo alternativo que garantice la continuidad del cauce, siendo establecidos de forma particular para cada caso, de conformidad y sin perjuicio de lo señalado en el artículo 59.7 del TRLA, y siempre que se garantice la supervivencia del ecosistema asociado a cada masa de agua."

Canal:

Se trata de la parte de la instalación encargada de dirigir el agua desde el azud hasta las turbinas de la central.

Cámara de carga:

La cámara de carga es un depósito localizado al final del canal del cual arranca la tubería forzada. Se utiliza como depósito final de regulación, aunque normalmente tiene solo capacidad para suministrar el volumen necesario para el arranque de la turbina sin intermitencias.

Tubería forzada:

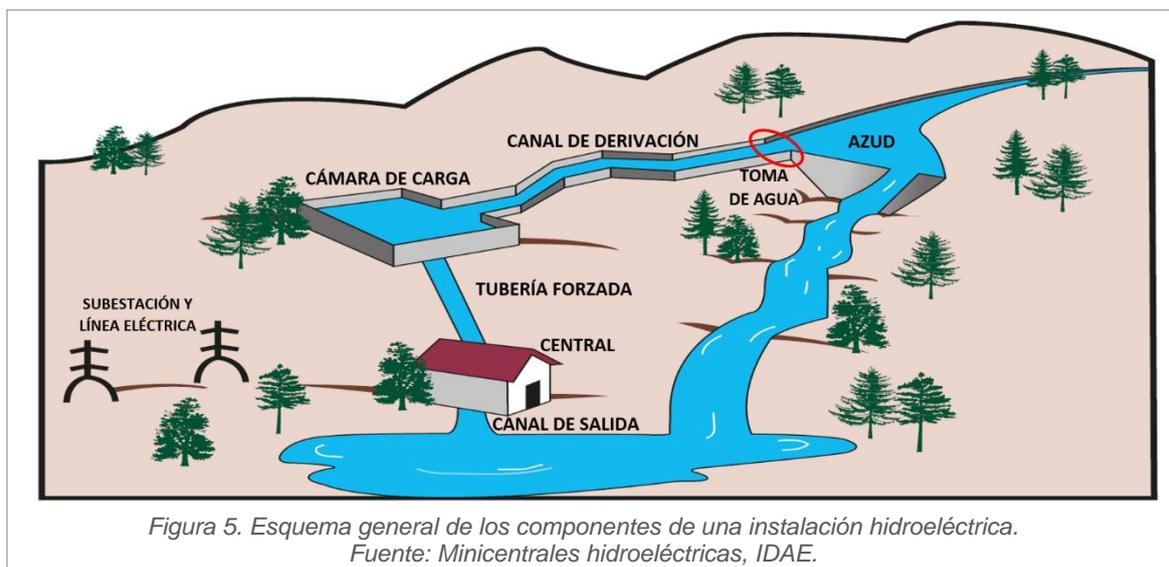
La tubería forzada es la que se encarga de llevar el agua desde la cámara de carga hasta la turbina.

Casa de máquinas o central:

Es dónde se transforma la energía del agua en electricidad gracias a las turbinas hidráulicas y los alternadores eléctricos.

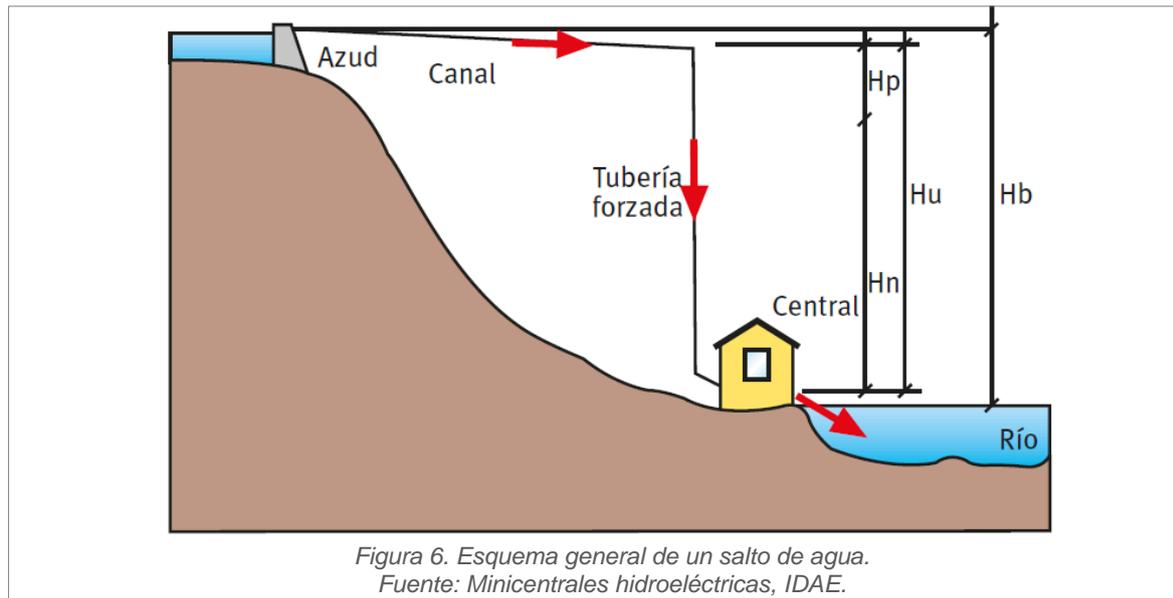
Subestación y línea eléctrica:

Se encarga de elevar la tensión generada para poder transportarla por las líneas eléctricas.

**3.3. Esquema general de un salto de agua**

El salto es la otra magnitud fundamental para el diseño de una minicentral hidroeléctrica. Deberá ser el máximo permitido por la topografía del terreno, teniendo en cuenta los límites que marcan la afección al medio ambiente y la viabilidad económica de la inversión. A continuación, se definen los siguientes conceptos [3]:

- Salto bruto (H_b): Altura existente entre el punto de la toma de agua del azud y el punto de descarga del caudal turbinado al río.
- Salto útil (H_u): Desnivel existente entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe en la turbina.
- Salto neto (H_n): Es la diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones. Representa la máxima energía que se podrá transformar en trabajo en el eje de la turbina.
- Pérdidas en carga (H_p): Son las pérdidas por fricción del agua contra las paredes del canal y sobre todo en la tubería forzada, más las pérdidas ocasionadas por turbulencia, al cambiar de dirección el flujo, al pasar a través de una rejilla o de una válvula, etc. Se miden como pérdidas de presión (o altura de salto) y se calculan mediante fórmulas derivadas de la dinámica de fluidos.



3.4. Turbina hidráulica

La turbina hidráulica es el elemento principal de la instalación y la encargada de transformar la energía mecánica en eléctrica. Por lo tanto, la selección correcta de la misma va a hacer que se consigan mayores aprovechamientos del recurso y, por consiguiente, mayor rendimiento de la central [4].

En la siguiente tabla se han realizado tres clasificaciones de turbinas hidráulicas atendiendo a tres puntos de vista:

- Según la dirección de golpeo del agua en el rodete
- Según el grado de reactividad
- Según la dirección del eje

Dirección de golpeo del agua en el rodete		Grado de reactividad		Dirección del eje	
Nombre	Explicación	Nombre	Explicación	Nombre	Explicación
Axiales	El agua entra en el rodete en la dirección del eje.	Acción	La incidencia del agua y el sentido del giro del rodete coincide en el punto en el que se produce el choque del agua sobre los alabes.	Horizontales	Eje paralelo al suelo
Radiales	El agua entra en sentido radial.		Toda la energía cinética con la que llega el agua a la turbina es utilizada para su giro. El sentido del rodete no coincide con la dirección de entrada y salida del agua.	Verticales	Eje perpendicular al suelo
Tangenciales	El agua golpea el rodete en su periferia.	Sobrepresión o Reacción	Estas turbinas utilizan la energía cinética y de presión para mover el rodete (la presión del agua a la salida es inferior a la de entrada).	Eje inclinado	Eje con cierta inclinación con el suelo

Tabla 2. Clasificación de las turbinas hidráulicas.
Fuente: Elaboración propia

Actualmente las turbinas más extendidas y utilizadas son la turbina Pelton, la turbina Francis y la turbina Kaplan.

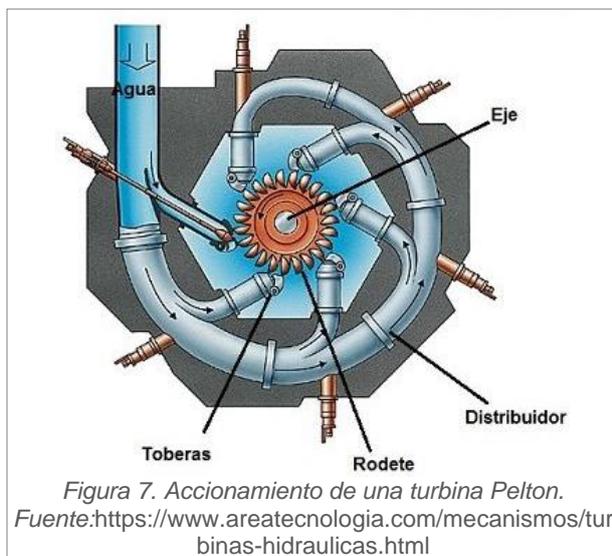
Turbina Pelton:

La turbina Pelton, denominada también como rueda hidráulica tangencial o rueda Pelton, es una turbina tangencial, de acción, y normalmente de eje horizontal.

Se diseñan para un rango de funcionamiento específico: saltos de gran altura, superiores a 200 m y caudales bajos.

Estructuralmente posee un diseño simple, compacto y tiene forma de rueda. Está compuesta principalmente por cucharones, deflectores o álabes móviles divididos, ubicados alrededor de su periferia.

El agua se distribuye mediante una especie de tubería circular que rodea a la turbina que se denomina distribuidor. El distribuidor está formado por una o varias entradas del agua al rodete.



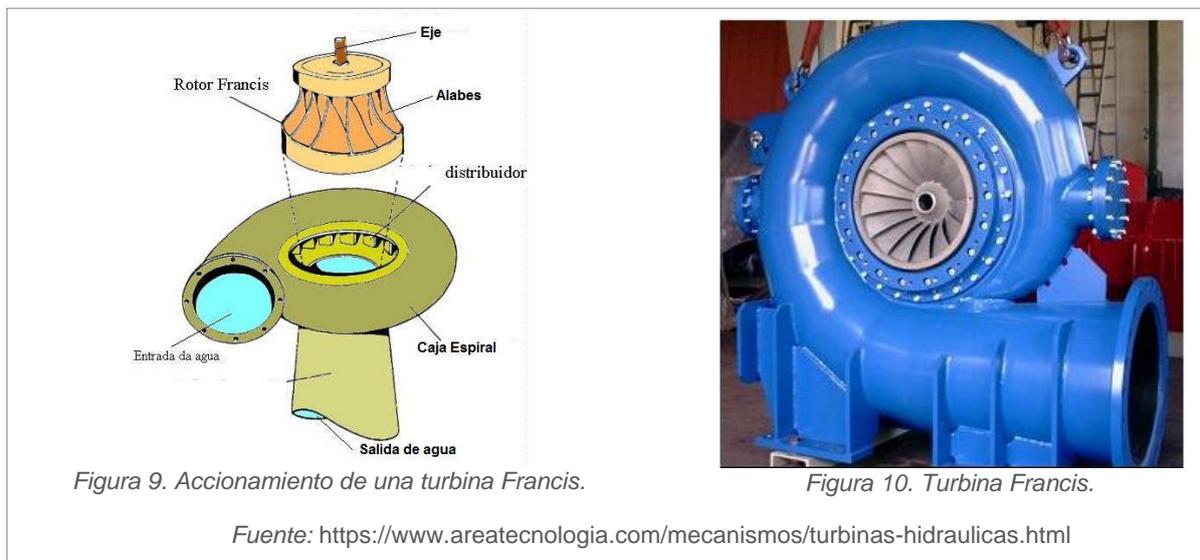
Turbina Francis:

La **turbina Francis** es una turbina radial-axial, de reacción, normalmente suele ser de eje vertical, pero también tiene la posibilidad de que su instalación sea horizontal.

Se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los dos metros hasta varios cientos de metros. Suele ser utilizada para saltos intermedios, inferiores o iguales a 200 m, y con caudales muy variados de agua, entre 2 y 200 metros cúbicos por segundo.

Para regular el caudal de agua de entrada en el rodete se utilizan unas paletas directrices situadas en forma circular, y cuyo conjunto se denomina distribuidor. El distribuidor está compuesto de aletas móviles para regular el caudal de agua que conduce

al rodete, el agua procedente de la tubería forzada entra perpendicularmente al eje de la turbina y sale paralelo a él.

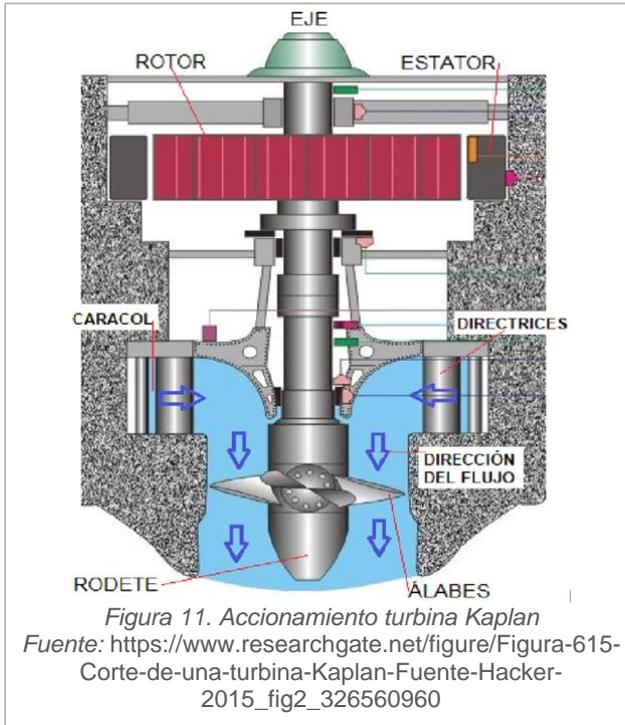


Turbina Kaplan:

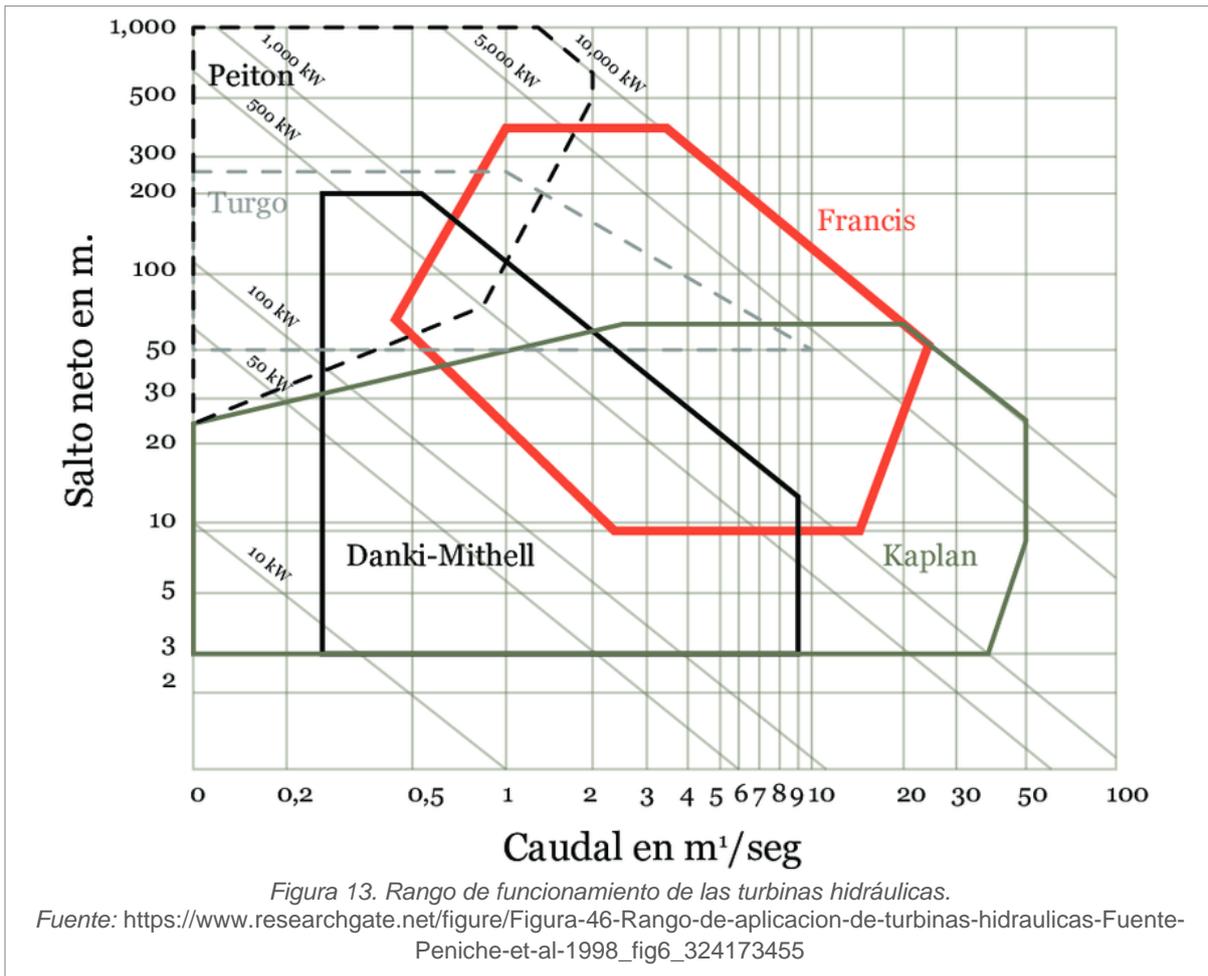
La **turbina Kaplan** es una turbina radial-axial, de reacción pura, y normalmente de eje vertical.

Se diseñan para un rango de funcionamiento específico: saltos de pequeña altura, inferiores o iguales a 50 m y grandes caudales que pueden incluso superar los 15 metros cúbicos por segundo.

Los álabes del rodete en las turbinas Kaplan son siempre regulables y tienen la forma de una hélice, mientras que los álabes de los distribuidores pueden ser fijos o regulables. Si ambos son regulables, se dice que la turbina es una turbina Kaplan verdadera; si solo son regulables los álabes del rodete, se dice que la turbina es una turbina Semi-Kaplan. Las turbinas Kaplan son de admisión axial, mientras que las semi-Kaplan puede ser de admisión radial o axial.



A modo de resumen, se plantea la figura 13, en la que se expone el rango de funcionamiento de las tres turbinas explicadas y de otras turbinas menos comunes.



3.5. Multiplicadora

Se trata de una caja de engranajes, que se instala entra la turbina hidráulica y el generador eléctrico. Se instala en aquellos casos en los que se necesite aumentar la velocidad de giro del eje con el fin de disminuir el número de pares de polos del generador eléctrico.

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} \quad (1)$$

Siendo:

p: pares de polos

f: frecuencia (Hz)

n: velocidad de giro del eje (rpm)

Reduciendo el número de par de polos, se consigue que el tamaño del generador sea más reducido, y por lo tanto el coste sea menor.

3.6. Generador eléctrico

Se trata de una máquina eléctrica rotativa que permite transformar la energía mecánica en energía eléctrica. A su vez, los generadores se suelen dividir en dos grupos: alternadores, que permiten obtener energía eléctrica alterna (generalmente en forma de sistema trifásico) y dinamos, que generan energía eléctrica en forma de corriente continua.

Existen dos tipos de alternadores que pueden ser utilizados en las minicentrales hidroeléctricas: el síncrono y el asíncrono.

Generador síncrono:

El **generador síncrono** se caracteriza por tener una velocidad de giro rígidamente definida por la frecuencia y el número de polos. Atendiendo a la forma de excitación se pueden clasificar en dos tipos: con excitación y con imán permanente.

Los **generadores síncronos con excitación** tienen unas ranuras mecanizadas en la periferia del rotor sobre las que se incorpora un bobinado distribuido por el cual se hace circular una corriente continua de valor (I_r) para generar el campo magnético del rotor. Esto aporta un grado de libertad extra, que es el control del campo magnético del rotor. Como inconvenientes se pueden citar la necesidad de anillos rozantes y escobillas para alimentarlo y las pérdidas joule que se dan en el mismo.

Los **generadores síncronos con imán permanente** tienen dos ventajas fundamentalmente: no necesitan anillos rozantes y no tienen pérdidas de joule en el rotor. Estas ventajas hacen que el rendimiento sea superior al anterior generador síncrono expuesto. Por otro lado, con los imanes permanentes se pueden obtener polos más pequeños, lo que resulta interesante para las máquinas multipolo. Como inconvenientes cabe destacar la pérdida de un grado de libertad que resulta muy interesante en el control

del punto de funcionamiento de la máquina, y la imposibilidad de obtener grandes potencias.

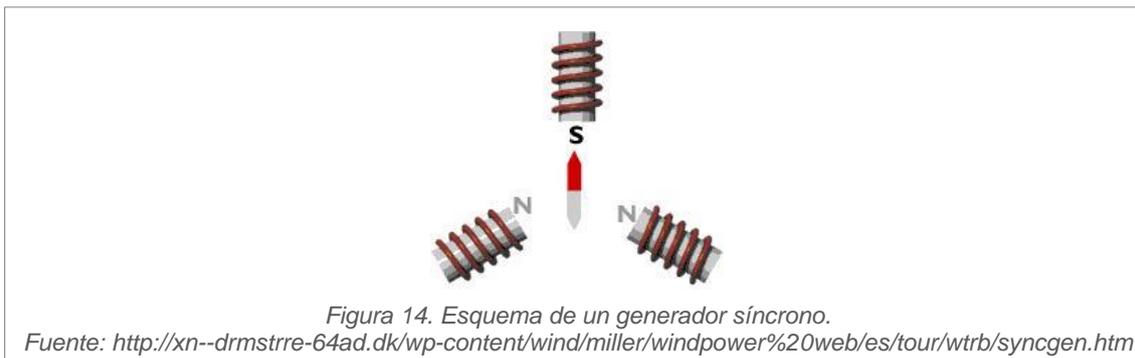


Figura 14. Esquema de un generador síncrono.

Fuente: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/syncgen.htm>

Generador asíncrono:

Las **máquinas asíncronas** más utilizadas son dos: máquinas de jaula de ardilla y máquinas de rotor bobinado.

Las **máquinas de jaula de ardilla** se caracterizan por tener en el rotor talladas unas ranuras en sentido longitudinal en las que se colocan unas barras conductoras de cobre o aluminio. Los extremos de estas barras conductoras se encuentran cortocircuitados por medio de los llamados anillos de cortocircuito igualmente conductores, adoptando la forma de una jaula de ardilla, que da origen a la denominación de este tipo de máquinas. Como ventajas, esta máquina es barata, robusta y menos pesada que otras máquinas asíncronas y se requiere un bajo mantenimiento. Como inconvenientes, en esta máquina no se tiene acceso al rotor.

Las **máquinas de rotor bobinado** están formadas por un devanado trifásico similar al estático. Las tres fases se suelen conectar en estrella y los otros tres extremos libres se conectan a tres anillos conductores, aislados entre sí y respecto del eje, sobre los que hacen contacto unas escobillas de grafito. Como ventajas, decir que es posible la conexión de resistencias externas a través de los anillos para limitar las corrientes de arranque, mejorar las características del par (pares de arranque) y controlar la velocidad del rotor. Como inconvenientes, decir que es más cara que la de jaula de ardilla debido a los materiales empleados y por su montaje, es más pesada y voluminosa y requiere un mayor mantenimiento.



Figura 15. Esquema de un generador asíncrono.

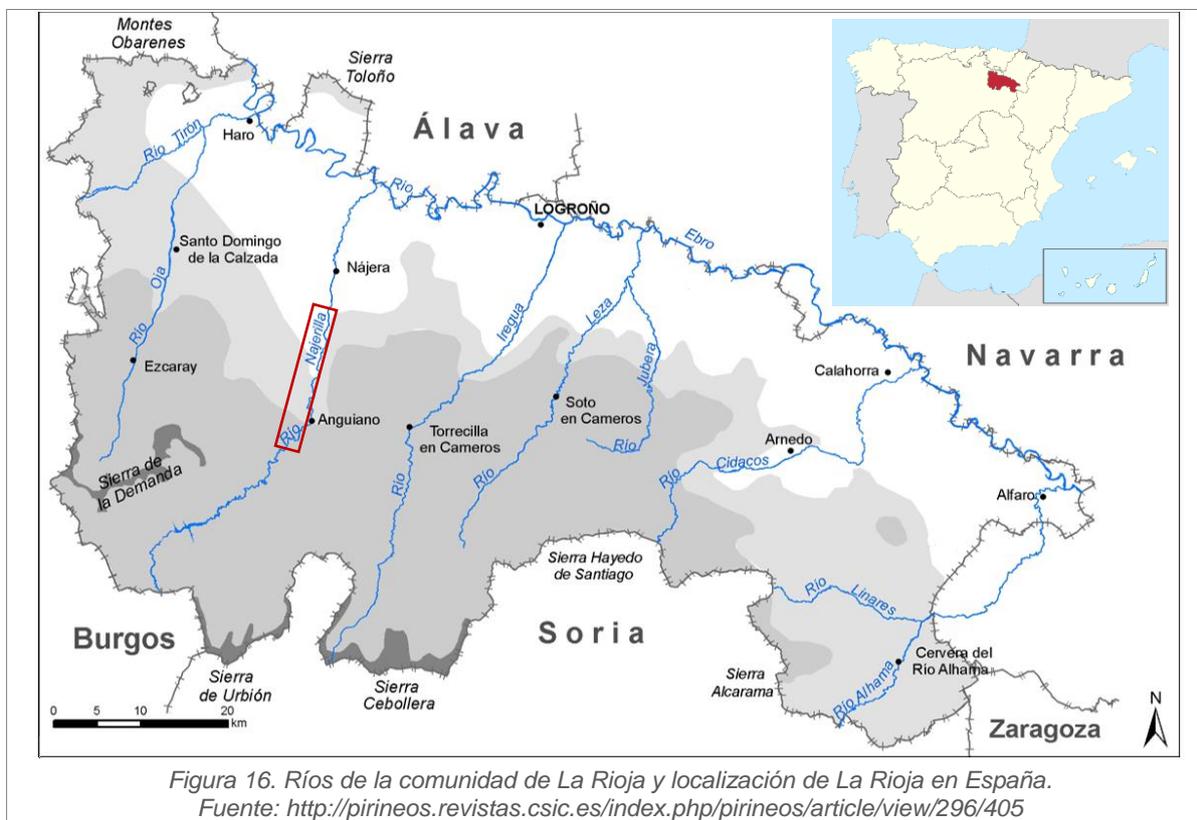
Fuente: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/async.htm>

4. DESCRIPCIÓN DEL EMPLEZAMIENTO

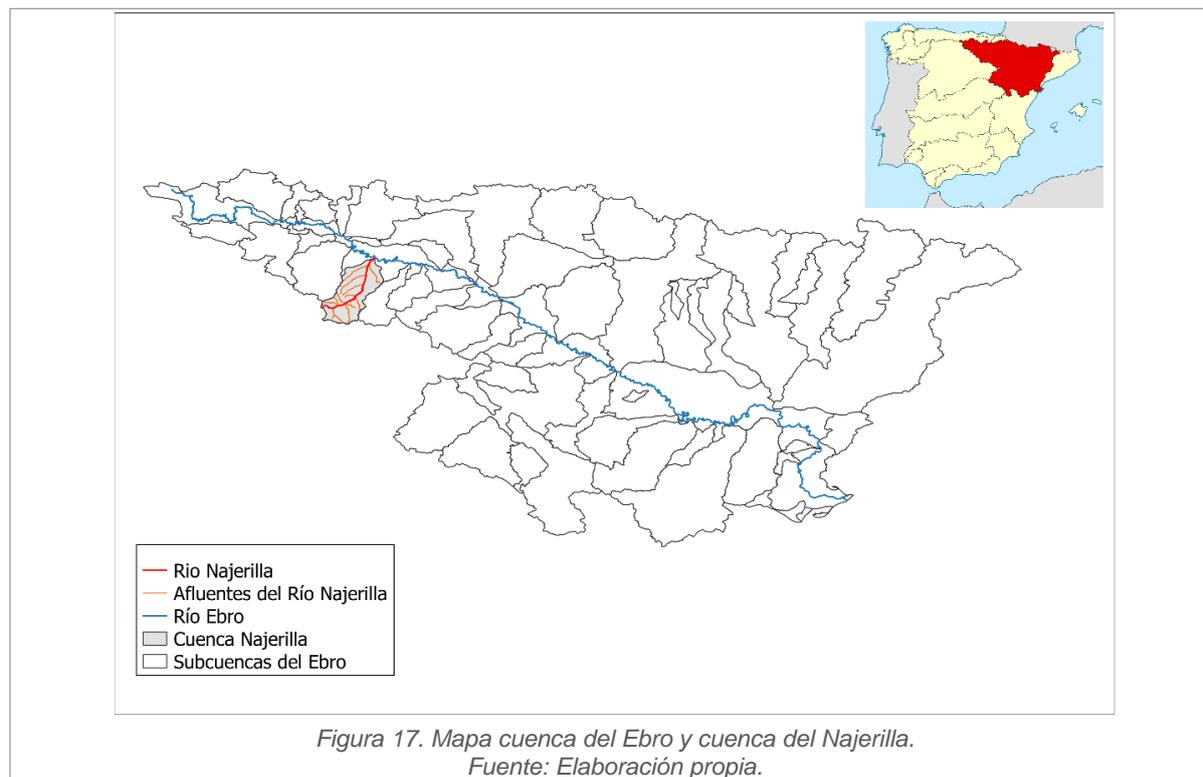
4.1. Río Najerilla

4.1.1. Localización del río Najerilla

En el siguiente mapa se observan los principales ríos de la comunidad de La Rioja. Se ha remarcado en rojo el río Najerilla:



El río Najerilla conforma una de las subcuencas de la cuenca del Ebro: la subcuenca del Río Najerilla.



4.1.1. Descripción del río Najerilla

El río Najerilla es el más caudaloso y regular de los ríos riojanos (a excepción del río Ebro). Desde su nacimiento (Neila, Burgos) hasta su desembocadura en el río Ebro tiene una longitud de 72,4 Km y recoge las aguas de una cuenca vertiente de 1.107 Km².

El río Najerilla nace en la Cordillera Ibérica entre las sierras del Neila y Urbión a unos 2.000 m.s.n.m, en un sistema de lagunas glaciales del que destaca Laguna Negra y Laguna Larga. Su curso se orienta hacia el noroeste a través de un estrecho valle hasta una barrera caliza en Anguiano. Después, el valle se ensancha notoriamente, pasando por glaciares y terrazas, hasta llegar a su desembocadura en las cercanías de Torremontalbo, a una altitud de 405 m.s.n.m.

En el cauce del Najerilla desembocan pequeños afluentes entre los que destacan los ríos Neila, Urbión, Brieva y Yalde en su margen derecha, y los ríos Tobías, Cárdenas y Tuerto en su margen izquierda.

El aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca se destina fundamentalmente al abastecimiento de agua a poblaciones, a la producción de energía hidroeléctrica y al regadío a través de un sistema de canales que integra la cuenca propia del Najerilla.

El río Najerilla en su mayor parte es de tipo sinuoso y en un pequeño porcentaje meandriforme y trezado, con distintas características en función de que el valle sea abierto, encajado o de fondo cóncavo.

La pesca resulta una actividad muy destacada en la cuenca del río Najerilla. Existen numerosos tramos de ríos acotados, en los que el Gobierno de La Rioja otorga permisos para la pesca en unas condiciones y normativa determinadas [5], [6].

En los tramos altos y medios del río, la comunidad piscícola está compuesta casi exclusivamente por la trucha común, el pez que más sube en altitud (1.800 m), y el piscardo o negrillo, un pequeño ciprínido que le acompaña hasta los 1.300 m. También es habitual encontrar al pez fraile o blenio de río [7].

4.2. Minicentral de Anguiano

La minicentral Hidroeléctrica de Anguiano se sitúa en el cauce del río Najerilla a su paso por el término municipal Anguiano y Brieva de Cameros (La Rioja), en el Camino de Valvanera, S/N, Anguiano-26322. En el siguiente mapa, figura 18, se ha remarcado la minicentral Anguiano:

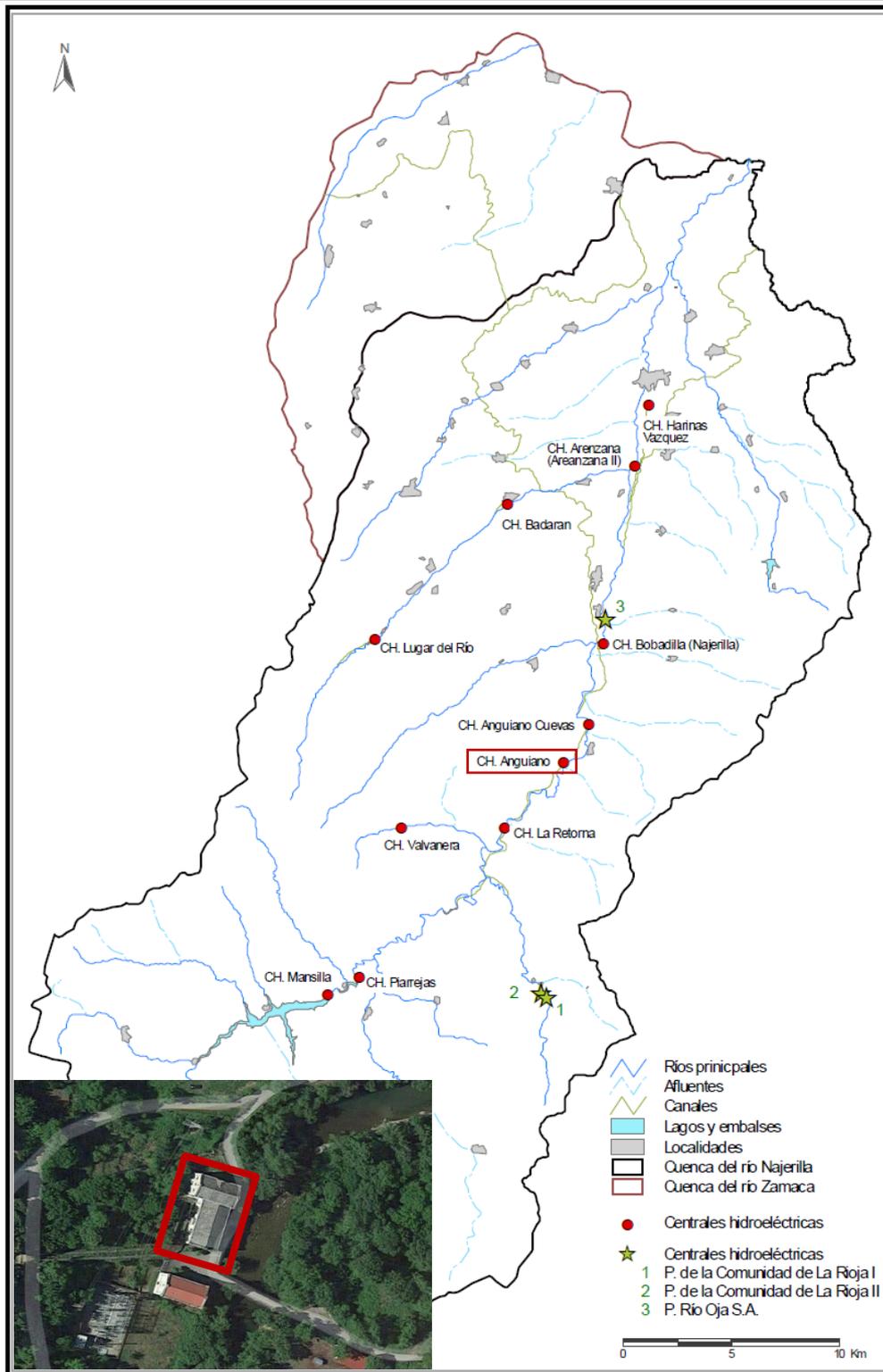


Figura 18. Centrales hidroeléctricas en funcionamiento y visión aérea de la central.
Fuente: Plan hidrológico de los ríos Najerilla y Zamaca y Google Maps.

4.3. Esquemas de instalaciones del río Najerilla

La figura 19 representa la disposición de las instalaciones construidas a lo largo del Najerilla. De esta forma se puede entender la disposición y localización del azud y la central de Anguiano. Adicionalmente, en el margen izquierdo se ha representado en planta el río Najerilla para poder conocer la posición de los aforadores con respecto a las centrales y poder analizar correctamente el aprovechamiento energético del río que se ha realizado a continuación.

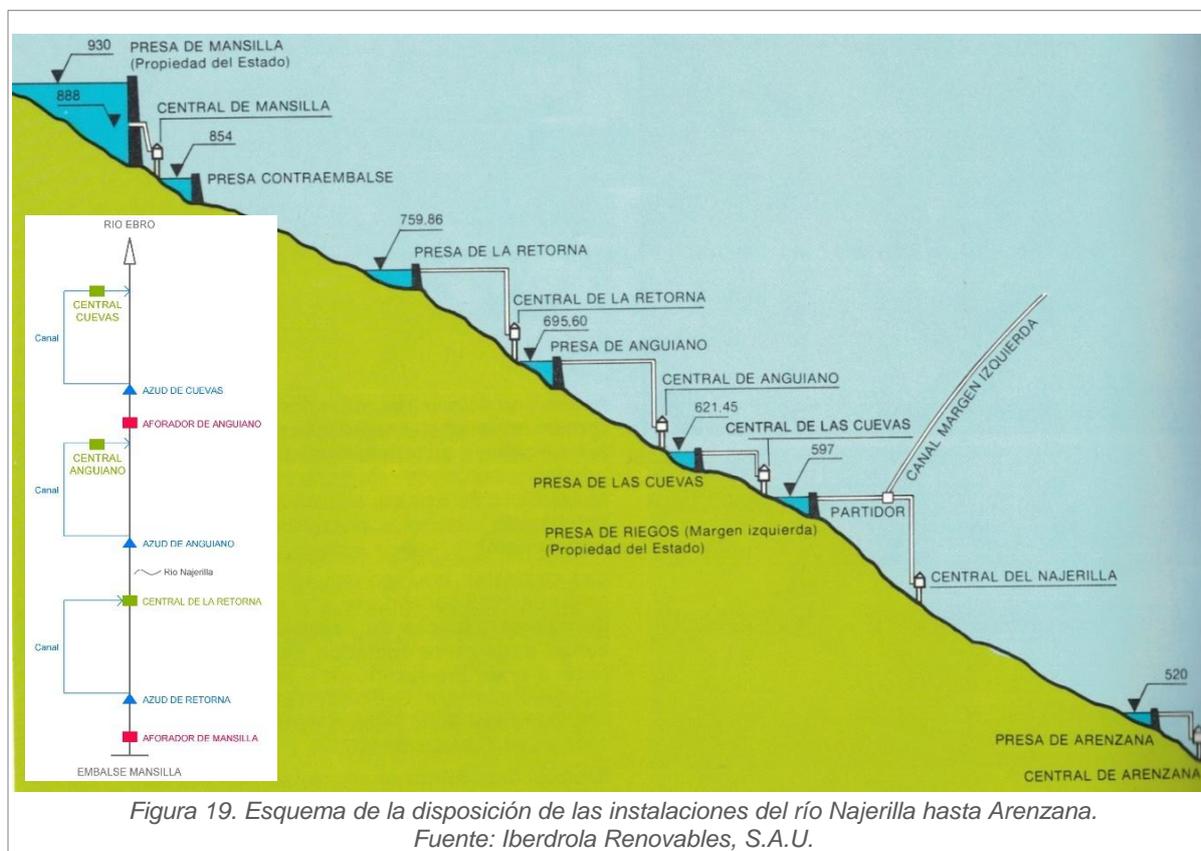


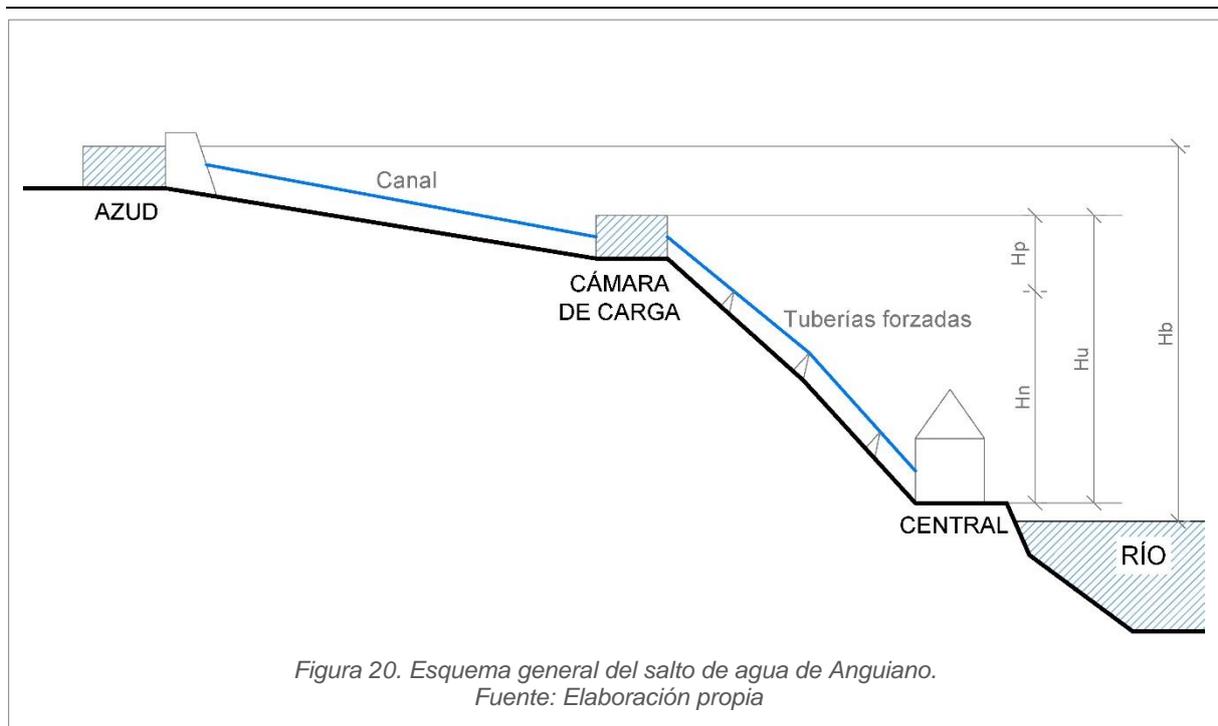
Figura 19. Esquema de la disposición de las instalaciones del río Najerilla hasta Arenzana.
Fuente: Iberdrola Renovables, S.A.U.

En adición a este esquema para una mejor comprensión del entorno y de la localización de las instalaciones se han adjuntado mapas de los ríos y de la localización de los aforadores en el anexo 1 [\[A1\]](#).

4.4. Descripción de la instalación

Todos los datos sobre la central que van a aparecer a continuación han sido aportados por Iberdrola Renovables, S.A.U.

Previamente al desarrollo de la explicación de los componentes de la instalación, se aporta el siguiente esquema en el que se observa un corte del terreno en el que se han representado los principales elementos del salto de agua de Anguiano (similar al esquema del punto 2.3. pero con los datos de Anguiano).



En la siguiente tabla se exponen los datos de los saltos de los que se tienen datos:

DATO	VALOR (m)
Salto bruto (H_b)	695,6
Salto útil (H_u)	67,23*

*Para obtener este valor se ha restado la cota del depósito de carga menos la cota de desagüe de las turbinas.

Tabla 3. Valores del salto de Anguiano.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.

4.4.1. Azud

El azud está ubicado a unos 50 m aguas abajo del desagüe de la Central de la Retorna, en el río Najerilla entre los términos Municipales el de Brieva de Cameros y Anguiano (La Rioja). En la figura 21 se puede observar la posición del azud con respecto de la central de la Retorna (remarcada en rojo la central y remarcado en amarillo el azud)



Figura 21. Vista aérea del azud de Anguiano.
Fuente: Google Maps

Se trata de un azud de vertedero de gravedad y de planta recta. Su estructura conforma un aliviadero de vertido libre. Adicionalmente, en el margen izquierdo se encuentra instalada una escala salmonera (figura 22 y 23) y en el derecho un desagüe de fondo, con una compuerta de 1,55 m de ancho por 1,50 m de alto con accionamiento manual (figura 24). Gracias a la escala salmonera se asegura el caudal ecológico de 400 l/s y con el desagüe de fondo se puede regular una aportación adicional de caudal al río.

En la margen derecha del azud también se encuentra la toma del canal (figura 26).



Figura 22. Escala salmonera.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Vista cercana de la escala salmonera.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Desagüe de fondo.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.

Se han querido recoger los datos principales datos del azud en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	DATO
Tipo de presa	Gravedad y planta recta
Altura desde los cimientos	8,5 m
Altura desde el cauce	7,5 m
Longitud de coronación	33,3 m
Cota de coronación	695,6 m
Tipo de aliviadero	Libre (rebosa por encima de la propia presa)
Anchura de aliviadero	28,70 m

Tabla 4. Datos de la presa.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.

4.4.2. Canal

Se trata de un canal de más 5 km que combina partes al descubierto con partes cubiertas.



Figura 25. Tramo del canal al descubierto.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.



Figura 26. Salida del desagüe de fondo al canal con limpia rejillas.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.

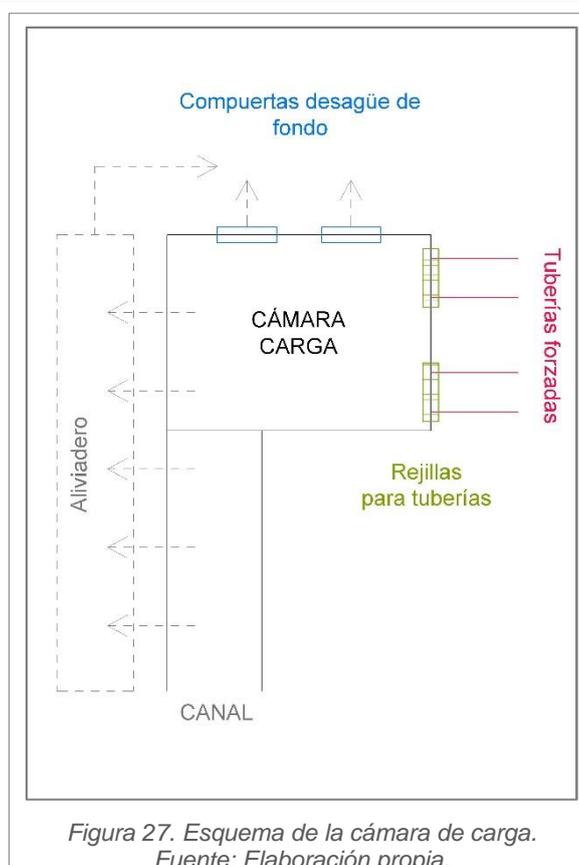
Se han querido recoger los datos principales datos del azud en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	DATO
Longitud total	5109 m
Longitud al descubierto	4347 m
Longitud cubierto	762 m
Tipo de sección	Rectangular
Dimensiones de la sección	2,5 m x 1,80 m Hay lugares en el que se ha recrecido: 2,5 m x 2,0 m
Capacidad máxima	5,6 m ³ /s
Velocidad	1,25 m/s
Pendiente	0,9 %

Tabla 5. Datos del canal.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.

4.4.3. Depósito de extremidad o cámara de carga

Se trata de un depósito trapezoidal con un aliviadero al final y en el margen derecho del mismo y con un desagüe de fondo en previsión de las posibles riadas. Tanto el aliviadero como el desagüe de fondo vierten a un canal de 2,70 m de ancho, 1,10 m de alto y 220 m de longitud que desagua al río Najerilla aguas abajo de la central. En la toma de las tuberías existen dos rejillas metálicas con limpiarrejillas automático.



Los datos principales de la cámara de carga se encuentran recogidos en la tabla 6:

CARACTERÍSTICA	DATO
Cota	690,65
Dimensiones de la sección	Longitud: 32,00 m Anchura inicial: 2,50 m Anchura final: 3,50 m
Volumen	80m ³
Dimensiones del aliviadero	Longitud: 13,50 m Lámina: 0,60 m Cota de vertido: 690,65 m
Dimensiones de las compuertas manuales del desagüe de fondo	Ancho: 0,85 m Alto: 1 m
Dimensiones de las rejillas	Ancho: 2,00 m Alto: 3,60 m

Tabla 6. Datos de la cámara de carga.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.



Figura 28. Compuertas para las tuberías forzadas y limpiarejas de la cámara de carga.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U.



Figura 29. Compuertas del desagüe de fondo.
Fuente: Elaboración propia.

4.4.4. Tuberías forzadas

Hay dos tuberías forzadas para alimentar los tres grupos. Para comprender por qué hay dos tuberías en vez de una hay que retrotraerse al año en que se fabricaron, 1921. Como se observa en la figura 31, las tuberías constan de ensamblajes, es decir, que se instalaron uniendo las partes ya fabricadas. Por lo tanto, en aquella época se decidió instalar dos porque resultaba más sencillo subir las partes más pequeñas de cada una de las tuberías que, por el contrario, subir las partes de una única que hubiera sido más grande.

En la parte inferior están unidas formando un anillo del cuál parten cinco derivaciones, tres para los grupos y dos para el vaciado de la misma. En las derivaciones para vaciado existen dos válvulas de vaciado con accionamiento manual y vierten directamente al río a través de una tubería de 16 m de longitud que atraviesa la central por la parte inferior.

Debido al anillo las pérdidas de carga en las tuberías se acrecientan por los codos a 90° existentes antes de entrar a las tuberías. Convendría estudiar la posibilidad de cambiar las tuberías por una única, de la cual y por medio de bifurcaciones; dar entrada a los tres grupos.

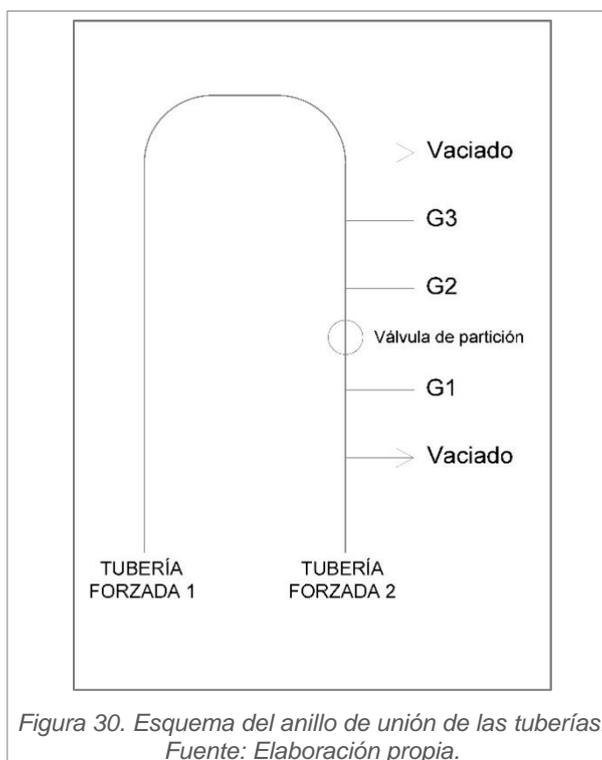


Figura 30. Esquema del anillo de unión de las tuberías.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 31. Bajada de las tuberías forzadas desde la cámara de carga hasta la central.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U



Figura 32. Derivaciones de la tubería a la entrada de la central.
Fuente: Elaboración propia.

En el anillo existe una válvula de partición de éste, colocada entre las tomas de los G-1 y G-2, la cual es de tipo compuerta de 1,20 m. de diámetro, con accionamiento manual. En la figura 33 se puede observar el anillo y la válvula de partición recuadrada en amarillo.

Esta válvula sirve como aislamiento extra de las turbinas en el caso de que surja la necesidad de cortar el paso del agua.



Figura 33. Anillo de unión de las tuberías y válvula de partición.
Fuente: Elaboración propia.

Los datos principales de las tuberías se encuentran recogidos en la tabla 7:

CARACTERÍSTICA	DATO
Longitud	194 m
Tipo de sección	Circular
Diámetro de la sección	1,20 m
Caudal	2,8 m ³ /s
Velocidad del agua	2,45 m/s
Material de construcción	Acero reblonado
Tipo de válvulas de entrada a la turbina	Compuerta
Diámetro de las válvulas	0,4 m

Tabla 7. Datos de las tuberías.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

4.4.5. Central

La central cuenta con tres grupos turbina-alternador. Las turbinas disponen de su correspondiente regulador de velocidad y de una regulación de la carga en función del nivel, estando acopladas a los alternadores directamente.



Figura 34. Grupo turbina-alternador.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 35. Visión en conjunto de los tres grupos turbina-alternador.
Fuente: Elaboración propia.

Las características principales de los grupos aparecen en la tabla 8:

TURBINA		ALTERNADOR	
CARACTERÍSTICA	DATO	CARACTERÍSTICA	DATO
Tipo	Francis de eje horizontal	Sistema	Trifásico
Marca	ESCHER-WYSS	Tipo	Síncrono
Caudal	2,6 m ³ /s	Conexión	Estrella
Salto bruto	67,19 m	Tensión	5000 V
Velocidad	750 rpm	Potencia	1450 KVA
Cota de salida del agua de las turbinas	623.42 m		

Tabla 8. Datos de las turbinas y los alternadores.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

Habitualmente se trabaja con uno de los grupos como principal y los dos restantes como auxiliares atendiendo a sus curvas de rendimiento.

5. ESTUDIO DE LA FRECUENCIA DE CAUDALES DEL RÍO

Para las industrias hidroeléctricas es importante ser capaz de describir la variación de los caudales del río a lo largo del tiempo de tal manera que se pueda optimizar el diseño o selección de la turbomáquina consiguiendo así una mayor producción y un mayor aprovechamiento energético del río.

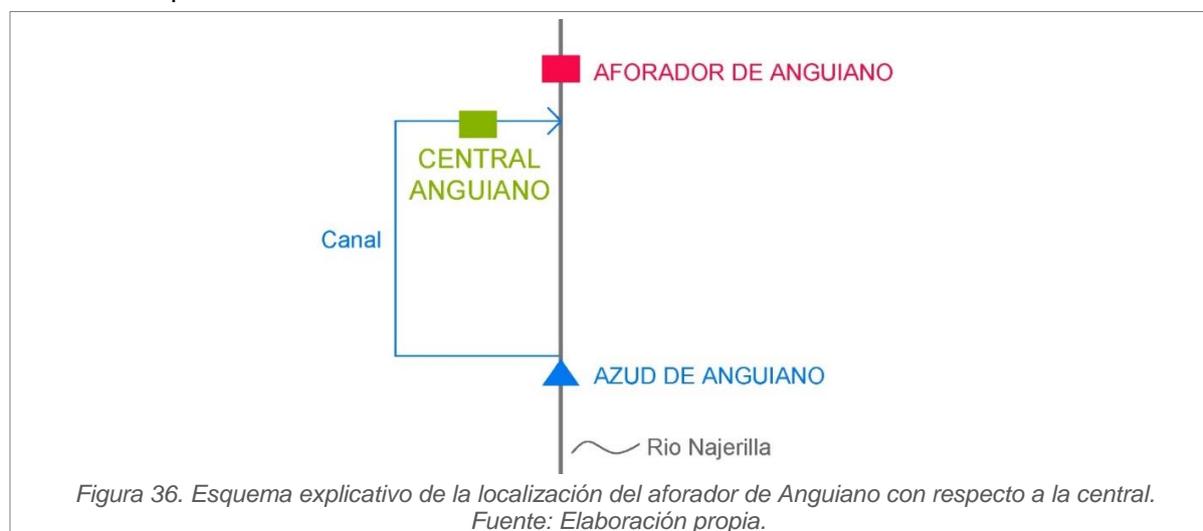
Dado que el caudal del río es un parámetro que depende de agentes externos como la lluvia, el deshielo, la estación del año etc. Lo más conveniente es realizar un estudio probabilístico para poder caracterizar hidrológicamente el régimen del río Najerilla.

Para realizar el estudio de los caudales de un río, es necesario obtener una serie de datos de caudales instantáneos lo suficientemente grande que incluya años secos, húmedo y normales.

5.1. Descripción de la serie de datos

En el caso del presente estudio, se realizó una petición a la **Confederación Hidrográfica del Ebro**, que facilitó caudales quinceminutales del aforador de Anguiano (A048) durante 13 años (2006-2018). Para facilitar el análisis se ha tratado únicamente los datos horarios, de esta forma se reduce el conjunto de datos, pero sigue estando asegurado un buen estudio hidrológico [8].

El aforador de Anguiano se sitúa en el río Najerilla a su paso por el municipio de Anguiano. Tal y como se ha representado en la figura 36, está situado aguas abajo de la minicentral que se está analizando.



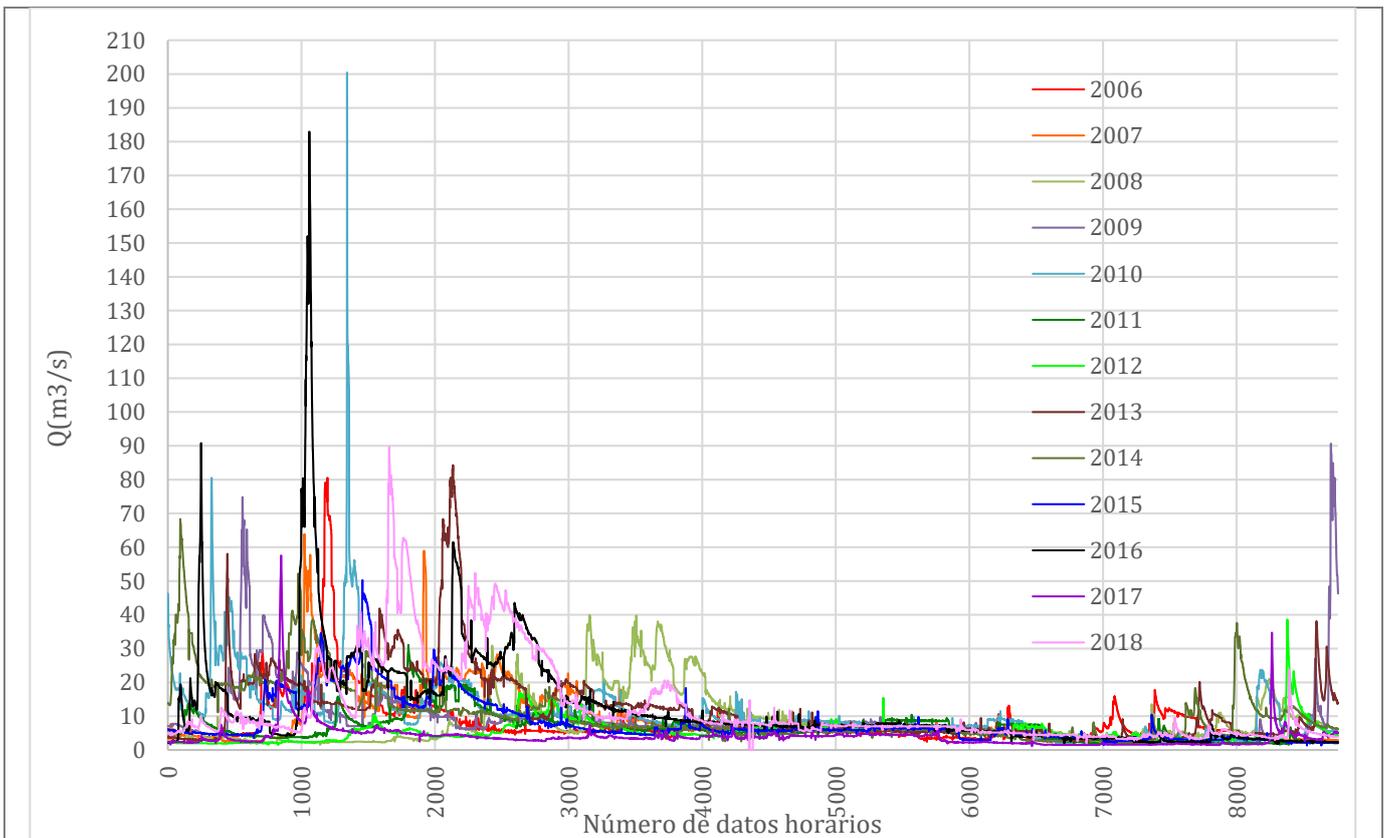


Figura 37. Hidrogramas anuales.

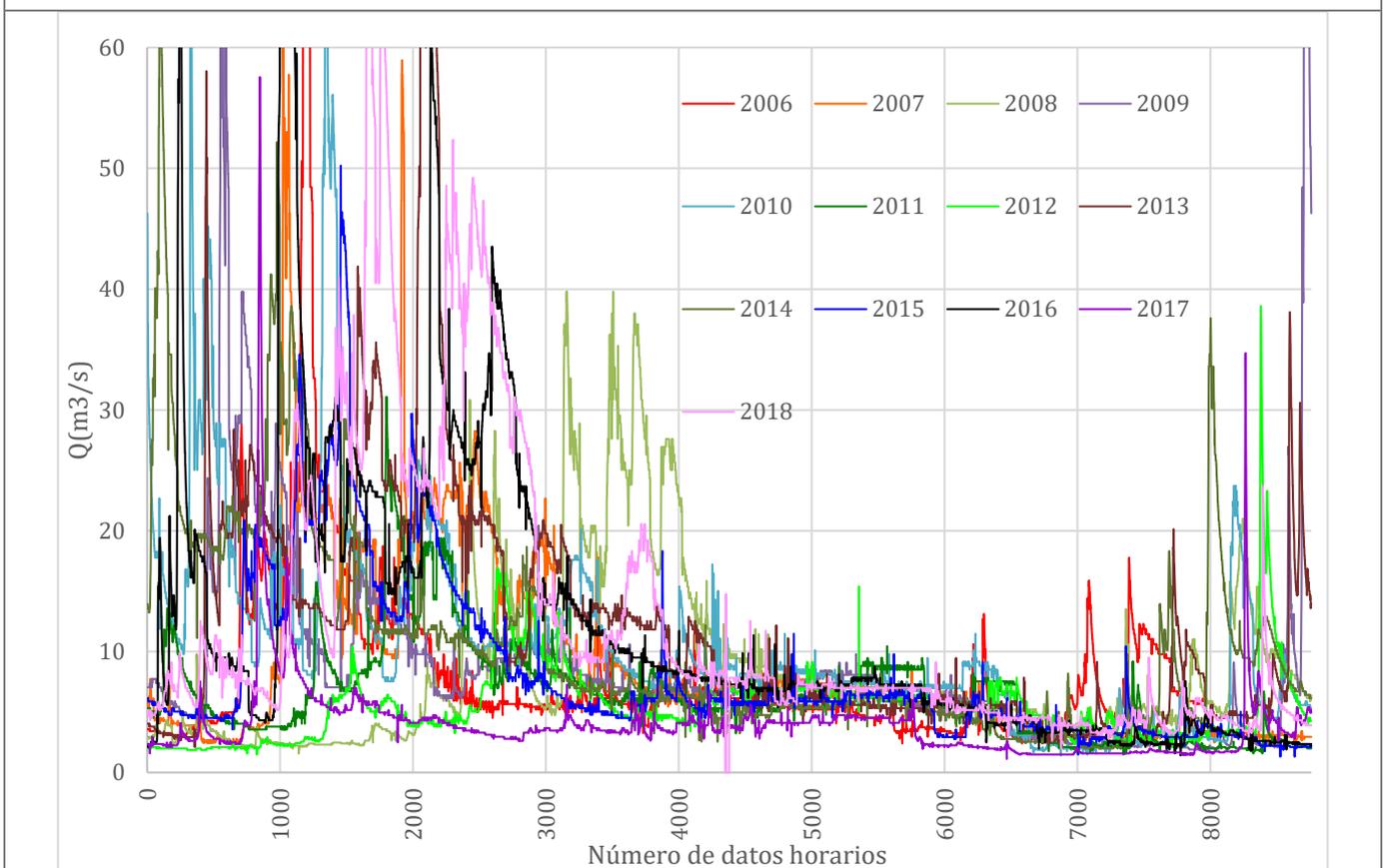


Figura 38. Hidrogramas anuales hasta 60 m³/s.

En las anteriores figuras se muestra la gran variabilidad del caudal de un río a lo largo de los años que se están estudiando y la necesidad, como ya se había determinado, de tratar de caracterizar el régimen hidrológico del cauce del río.

A continuación, se ha realizado un estudio general del histórico de caudales mediante las **curvas de caudales clasificados** y las **curvas de probabilidad** para caracterizar, en términos adimensionales, el régimen hidrológico del cauce a efectos de su aprovechamiento hidroeléctrico. Con ellos se ha comparado las curvas de los distintos años para determinar los húmedos y los secos y se han obtenido los denominados “caudales significativos del estudio”.

Posteriormente, se ha realizado un análisis más concreto de los datos mediante la **distribución de Weibull**. Primeramente, se ha obtenido la gráfica correspondiente a la distribución acumulada, se ha denominado “función de Weibull no paramétrica”. Posteriormente, se han realizado varias opciones de ajustes por mínimos cuadrados para la obtención de los parámetros que definen la distribución Weibull. Por último, se ha decidido cuál es el mejor ajuste a partir de la Prueba de Bondad de Ajuste Chi Cuadrado. Una vez determinados los parámetros se ha obtenido la probabilidad de los “caudales significativos del estudio” y se han comparado con los obtenidos a partir de las curvas de probabilidad de caudales.

Por lo tanto, gracias a estos tres análisis se ha obtenido la caracterización hidrológica completa del río Najerilla.

5.2. Curvas de caudales clasificados

Se debe obtener una serie anual lo suficientemente grande, para realizar una distribución estadística que tipifique los años en función de la aportación registrada: años secos y húmedos. En el presente estudio, como ya se ha adelantado, se ha contado con datos históricos de 13 años. Se ha realizado un promedio de los valores de caudales de cada hora de un día para obtener un único valor de caudal diario.

La clasificación en orden creciente de los registros estimados permite la determinación del número de horas del año que un cierto valor de caudal es igualado o excedido. La representación gráfica de estos caudales clasificados frente al número de días correspondiente da como resultado la "curva de duración de caudales".

Adicionalmente, es necesario obtener el promedio de caudal para cada día de los distintos años. Al representar la curva de duración de caudales media del año se ha obtenido una separación entre años secos, por debajo de la curva, y húmedos, por encima, tal y como muestra la figura 39, donde los distintos años muestran desviaciones con respecto a la media.

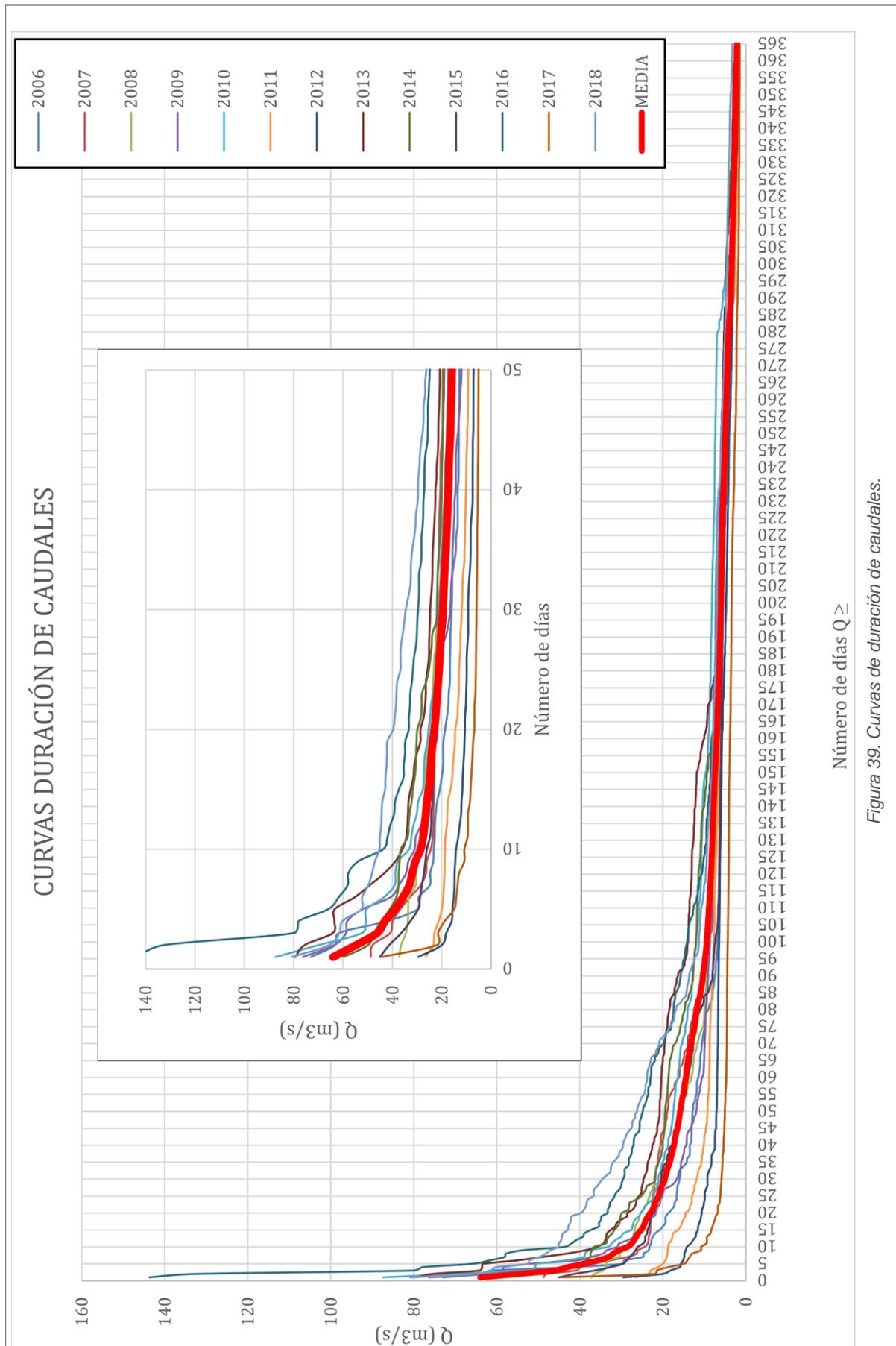


Figura 39. Curvas de duración de caudales.

En la tabla 9 se han recogido las conclusiones de la tipología de año en cuanto a sequedad o humedad:

AÑO	TIPO
2006	SECO
2007	HÚMEDO
2008	SECO
2009	SECO
2010	HÚMEDO
2011	SECO
2012	SECO
2013	HÚMEDO
2014	HÚMEDO
2015	SECO
2016	HÚMEDO
2017	SECO
2018	HÚMEDO

Tabla 9. Tipo de año atendiendo al caudal en el aforador de Anguiano.

Con estas curvas también se pueden obtener los caudales característicos tomando el año medio obtenido. Se ha denotado el caudal característico como Q_x , es decir, el caudal que circula por el río durante x días al año.

CAUDAL CARACTERÍSTICO	VALOR (m ³ /s)
Q_1 o $Q_{\text{máximo}}$	63,99
Q_{30}	19,54
Q_{60}	14,46
Q_{80}	11,78
Q_{90}	10,36
Q_{100}	9,45
Q_{120}	8,43
Q_{150}	7,43
Q_{180}	6,42
Q_{210}	5,87
Q_{240}	5,23
Q_{270}	4,45
Q_{300}	3,48
Q_{330}	2,72
Q_{365} o $Q_{\text{mínimo}}$	2,13

Tabla 10. Caudales característicos del año medio.

Con los valores de la tabla 10 se ha caracterizado hidrológicamente el río Najerilla a su paso por el aforador de Anguiano y se ha concluido que el río Najerilla es un río

permanente, es decir, que no se seca a lo largo del año (su caudal mínimo característico para un año medio es Q_{365} o $Q_{\text{mínimo}} = 2,13 \text{ m}^3/\text{s}$).

Los valores remarcados en azul, son aquellos que implican directamente al presente trabajo:

- El caudal ecológico lo fija el Organismo de cuenca (Confederación Hidrográfica del Ebro). Este suele considerar igual al 10% del caudal medio interanual, lo que muchas veces se trata como Q_{330} .
- El caudal de equipamiento Q_e , caudal para conseguir que el volumen turbinado sea máximo, se encuentra en el intervalo de la curva comprendido entre el Q_{80} y el Q_{100} . Por lo tanto, se ha seleccionado el Q_{90} que corresponde con el valor medio del intervalo: $Q_e = 10,36 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.3. Curvas de probabilidad

Otra forma de determinar si un año es húmedo o seco es con las curvas de probabilidad. Estas curvas también se utilizan para determinar los caudales significativos y la probabilidad que tienen de darse.

A partir de los datos diarios de la serie estimada de 13 años, se han determinado las curvas para determinados porcentajes de años húmedos y secos, es decir, **las curvas de probabilidad**. Para su obtención se ha procedido del siguiente modo:

- Se clasifican los caudales diarios en magnitud creciente, para cada uno de los 13 años de la serie, obteniéndose las curvas de duración de caudales de cada uno de los 13 años.
- Para cada uno de los 365 intervalos en la escala de tiempos, se ordenan los 13 caudales correspondientes en magnitud decreciente (ordenar los caudales de forma decreciente en horizontal).
- Una vez ordenados todos los caudales, se calculan los valores de las frecuencias acumuladas de los mismos, en cada uno de los 365 intervalos de tiempo, mediante la expresión de no paramétrica de Weibull:

$$F(Q) = \frac{m}{n+1} \quad (2)$$

Siendo:

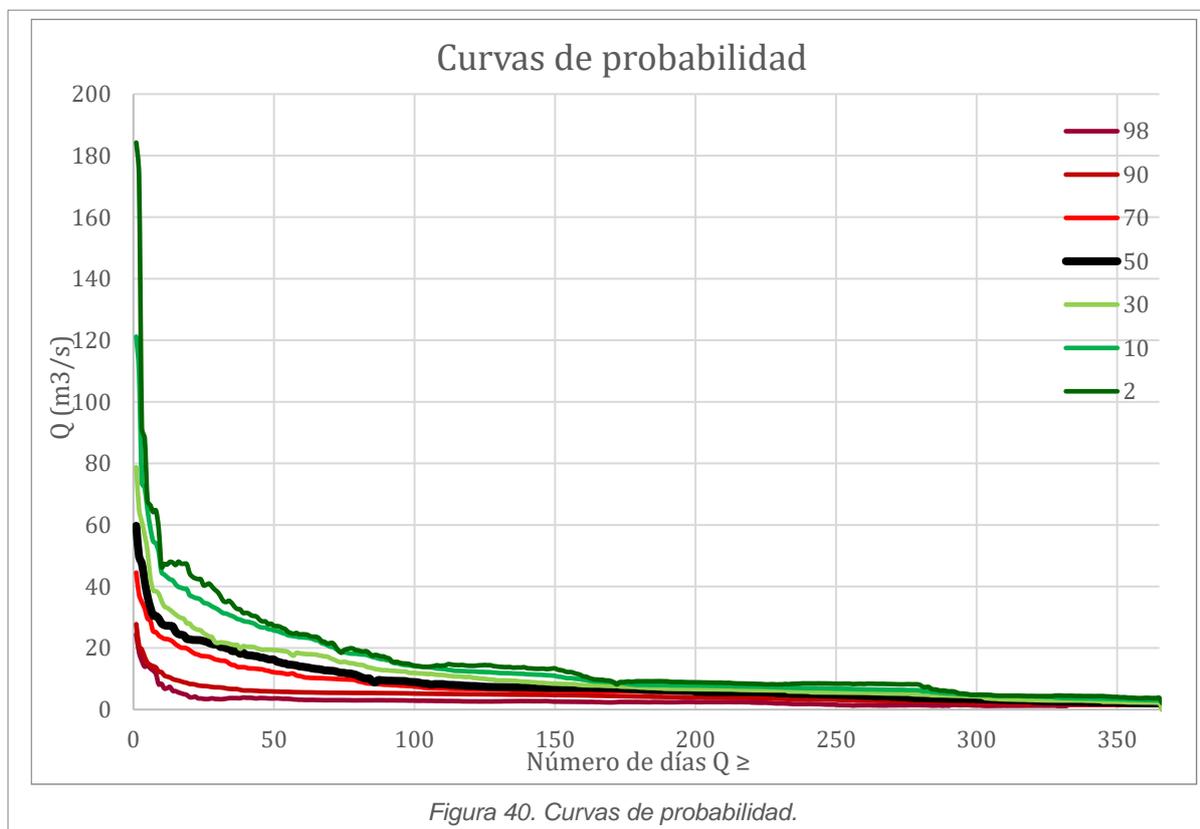
m: representa el rango (1,2,..., 13)

n: representa el número de años de la serie (13).

- En este momento, se selecciona interpolando cuando sea preciso, el valor de caudal para cada nivel de probabilidad $p=2, 10, 30, 50, 70, 90$ y 98% , y para cada intervalo de

tiempo (1,2,...,365), de forma que para un nivel de probabilidad p exista una proporción, p , de datos menores que él.

- Por último, se representan las 7 curvas calculadas de tal manera que la del 50% separa a los años secos de los húmedos, quedando entre la del 30% y la del 10% los años húmedos, e igualmente entre la del 70% y la del 90% los años secos.



Como se ha explicado, estas curvas se utilizan para determinar la tipología de un año en cuanto a la hidrología (año seco o año húmedo) y para obtener los caudales significativos. Se ha decidido exponer únicamente la segunda parte, la obtención de los caudales significativos, debido a que la primera parte ya se ha definido con las curvas de duración de caudales.

Según las conclusiones que se obtuvieron en los ensayos realizados por Iberdrola Renovables S.A.U. en la minicentral de Anguiano [\[AIII\]](#) para la mejor utilización del caudal para obtener la máxima potencia, es necesario situar a las máquinas en las aperturas de distribuidor que aparecen en la tabla 11. A esta tabla se le ha añadido la columna de caudal en el aforador ya que es de dónde se han sacado los datos. Para obtener esta columna basta con sumar al caudal del canal el caudal ecológico, ya que el aforador se halla aguas abajo de la central (figura 36).

	Apertura (%)	Caudal canal (m ³ /s)	Caudal aforador (m ³ /s)	Potencia (kW)
GRUPO 1	70	2,14	2,54	1077
GRUPO 2	64	1,56	1,96	665
GRUPO 3	70	1,90	2,3	980
TOTAL	-	5,60	6	2722

Tabla 11. Condiciones óptimas para el mejor reparto del caudal.
Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

De la curva del 50% de ocurrencia, se han deducido los valores de caudal significativos del régimen de flujo del río en situación normal. En la siguiente tabla se exponen los valores significativos para este estudio, es decir, los valores de caudal necesarios para la puesta en marcha de las turbinas en distintas situaciones.

Caudales medios diarios (m ³ /s)	Nº días Q ≥	Porcentaje anual (%)
1,96 (Caudal para el funcionamiento único de G2)	365 (El mínimo caudal es 1,99)	100
2,3 (Caudal para el funcionamiento único de G3)	349	95,62
2,54 (Caudal para el funcionamiento único de G1)	334	91,51
4,26 (Caudal para el funcionamiento de G2 + G3)	264	72,33
4,5 (Caudal para el funcionamiento de G1 + G2)	260	71,23
4,84 (Caudal para el funcionamiento de G1 + G3)	248	67,95
6 (Caudal para funcionamiento ideal de los grupos)	199	54,52

Tabla 12. Caudales más significativos del régimen normal de flujo de río (Curva del 50% de ocurrencia).

Como se puede observar, el caudal de este río permite el funcionamiento de al menos una turbina, la turbina 2, durante todo el año. También se puede considerar alto el porcentaje de días en los cuales se puede turbinar con los tres grupos.

5.4. Análisis estadístico de Weibull

5.4.1. Fundamento teórico

Uno de los conceptos más importantes de la teoría de probabilidades es el de variable aleatoria que, intuitivamente, puede definirse como cualquier característica medible que toma diferentes valores con probabilidades determinadas. Toda variable

aleatoria posee una distribución de probabilidad que describe su comportamiento. En el caso de este trabajo, la variable que entra en estudio es el caudal. Además de ser una variable aleatoria, el caudal también es una variable continua ya que puede tomar cualquier valor de un intervalo. Por ello, de los numerosos métodos que existen para la realización de un estudio hidrográfico se ha elegido la **distribución de Weibull**.

Esta distribución se utiliza para modelar situaciones del tipo tiempo-fallo, modelar tiempos de vida o en el análisis de supervivencia. Es muy habitual también utilizarla para caracterizar comportamientos climáticos como la velocidad del viento o la lluvia.

Para definir la **probabilidad acumulada** del caudal y hay que hacerlo mediante la función de distribución. Por lo tanto, para este caso, la función de distribución estará basada en la teoría de la distribución de Weibull [9].

5.4.2. Función distribución de Weibull

Como se ha descrito anteriormente, una forma habitual de describir la **probabilidad acumulada** del caudal es mediante la función de distribución. Se trata de una función matemática que da la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor igual o inferior a x:

$$F(x) = p(X \leq x) \quad (3)$$

En particular, la función de distribución de Weibull permite determinar la probabilidad de que el caudal del río sea menor o igual a un cierto valor de caudal Q para un año medio. Se define como:

$$F(Q) = 1 - e^{-\left(\frac{Q}{c}\right)^k} \quad (4)$$

Siendo:

Q: caudal del río (m³/s)

c: factor de escala (m³/s)

k: factor de forma (adimensional)

El **parámetro de forma de Weibull, k**, también se conoce como la pendiente de Weibull. Esto se debe a que el valor de k es igual a la pendiente de la curva de una gráfica de probabilidad. Por lo tanto, la monotonía de la razón de fallo se define en términos de este parámetro. Puede ser monótona creciente o monótona decreciente dependiendo del valor que tome el parámetro:

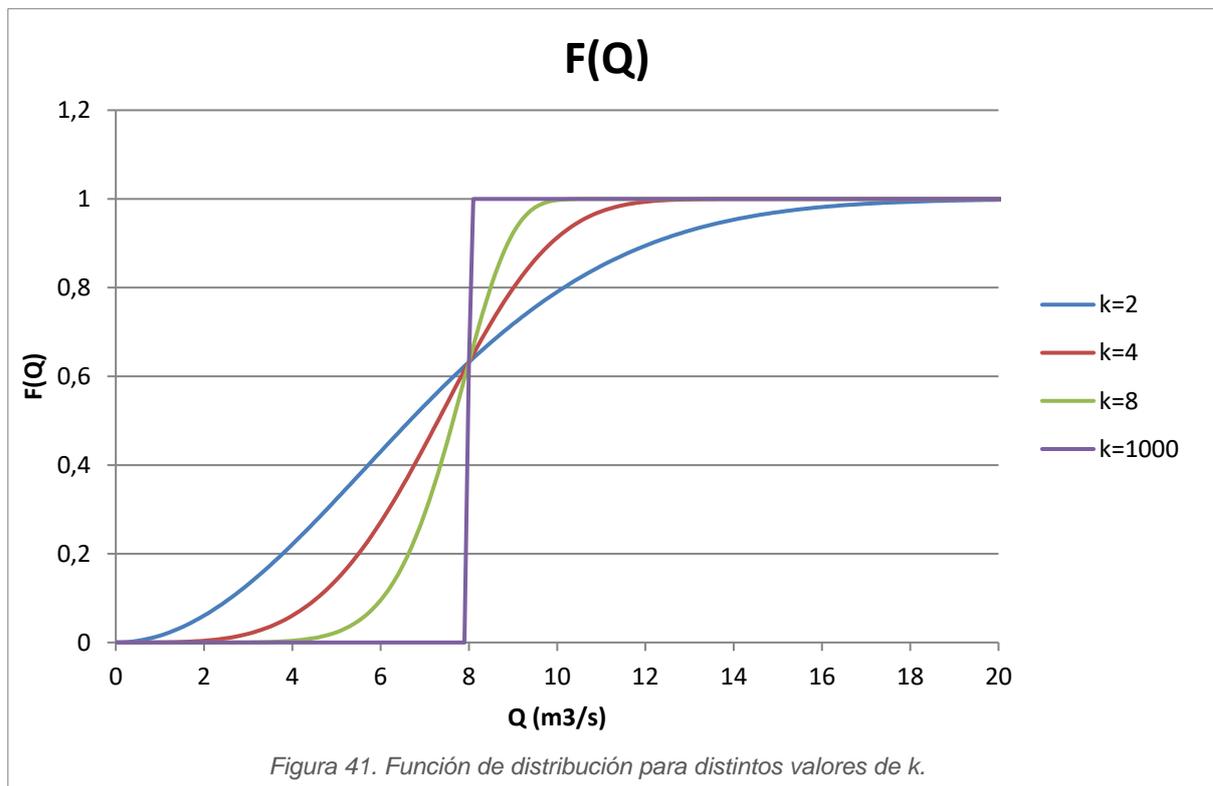
- **k < 1**: La tasa de falla que disminuye con el tiempo

- $k \cong 1$: La tasa de falla bastante constante con el tiempo
- $k > 1$: La tasa de fallas que aumenta con el tiempo

El **parámetro de escala de Weibull, c** , afecta a la escala de abscisas. Un cambio en el parámetro de escala, tiene el mismo efecto en la distribución que un cambio en la escala de abscisas.

Analizando la expresión de la función de distribución se puede concluir que cuando el caudal (Q) tiende a infinito, la función tiende a 1. Esto quiere decir que, para valores de caudal muy grandes, la probabilidad de tener caudales más pequeños es muy elevada.

La figura 41 muestra un gráfico donde puede verse como varía la función de distribución con respecto del caudal. Se ha mantenido el factor de escala constante ($c=8$) y se ha ido variando el factor de forma.



Como se observa en la gráfica, al aumentar el factor de forma la pendiente aumenta considerablemente, sobre todo alrededor del “punto de inflexión”.

5.4.3. Cálculo de los parámetros de Weibull

A partir de los valores de caudales medidos (horarios, diarios...) en un río para uno o varios, se determinan los parámetros c y k por un **ajuste de mínimos cuadrados** a partir de la función de distribución $F(Q)$:

$$F(Q) = 1 - e^{-\left(\frac{Q}{c}\right)^k} \quad (5)$$

Aplicando logaritmos neperianos a ambos lados de la ecuación, se obtiene:

$$\ln(1 - F(Q)) = -\left(\frac{Q}{c}\right)^k \quad (6)$$

Aplicando nuevamente logaritmos neperianos a ambos lados de la ecuación, se obtiene:

$$\ln(-\ln(1 - F(Q))) = k \ln\left(\frac{Q}{c}\right) \quad (7)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(Q))) = k \ln Q - k \ln c \quad (8)$$

Se ajusta por mínimos cuadrados a la recta: $y = kx + n$

$$y = \ln(-\ln(1 - F(Q))) \quad (9)$$

$$x = \ln Q \quad (10)$$

$$n = -k \ln c \quad (11)$$

De esta forma, la pendiente de la recta proporciona el valor de k y el valor de c a partir de la siguiente expresión:

$$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)} \quad (12)$$

5.4.4. Bondad del ajuste por mínimos cuadrados

El ajuste idóneo se ha elegido conforme la comparación con la función de Weibull no paramétrica. Es decir, se ha elegido como bueno aquel que mejor ajuste dicha distribución.

Para ello se va ha representado la curva de la **función de distribución acumulada de Weibull** (ecuación 5) para los valores de los parámetros obtenidos junto con la curva de distribución acumulada no paramétrica de Weibull. De esta forma se puede comparar y elegir cuál es el mejor ajuste.

Seguidamente se ha realizado la Prueba de Bondad de Ajuste Chi Cuadrado. En general un test de bondad de ajuste se utiliza para discriminar si una colección de datos o muestra se ajusta a una distribución teórica de una determinada población.

La fórmula de cálculo del estadístico Chi Cuadrado utilizado en el test de bondad de ajuste Chi Cuadrado corresponde a:

$$X_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (13)$$

El subíndice c corresponde a los grados de libertad, O_i corresponde al valor observado para la clase i -ésima y E_i el valor esperado de la clase i -ésima. En el caso del presente estudio O_i son los valores de la función acumulada no paramétrica de Weibull y E_i son los valores de la función paramétrica de Weibull.

Se han planteado las siguientes hipótesis:

- H_0 : Los datos se ajustan a la distribución dada. (Esta hipótesis se da si: $X_c^2 < X_{\text{tabla}}^2$)
- H_1 : Los datos no se ajustan a la distribución dada. (Esta hipótesis se da si: $X_c^2 > X_{\text{tabla}}^2$)

Donde la “distribución dada” corresponde a una distribución teórica (función paramétrica de Weibull) a la cual queremos ajustar nuestros datos categorizados.

Para poder elegir correctamente de la tabla de distribución Chi Cuadrado es necesario calcular el número de grados de libertad y determinar el grado de aceptación:

- $c = n^\circ \text{ de intervalos} - n^\circ \text{ de parámetros} - 1$ (14)
- Para este estudio se ha determinado que el grado de aceptación sea del 95%, es decir, un grado de error del 5%.

5.4.5. Ajuste de la Función de Weibull a los datos de caudal de Anguiano

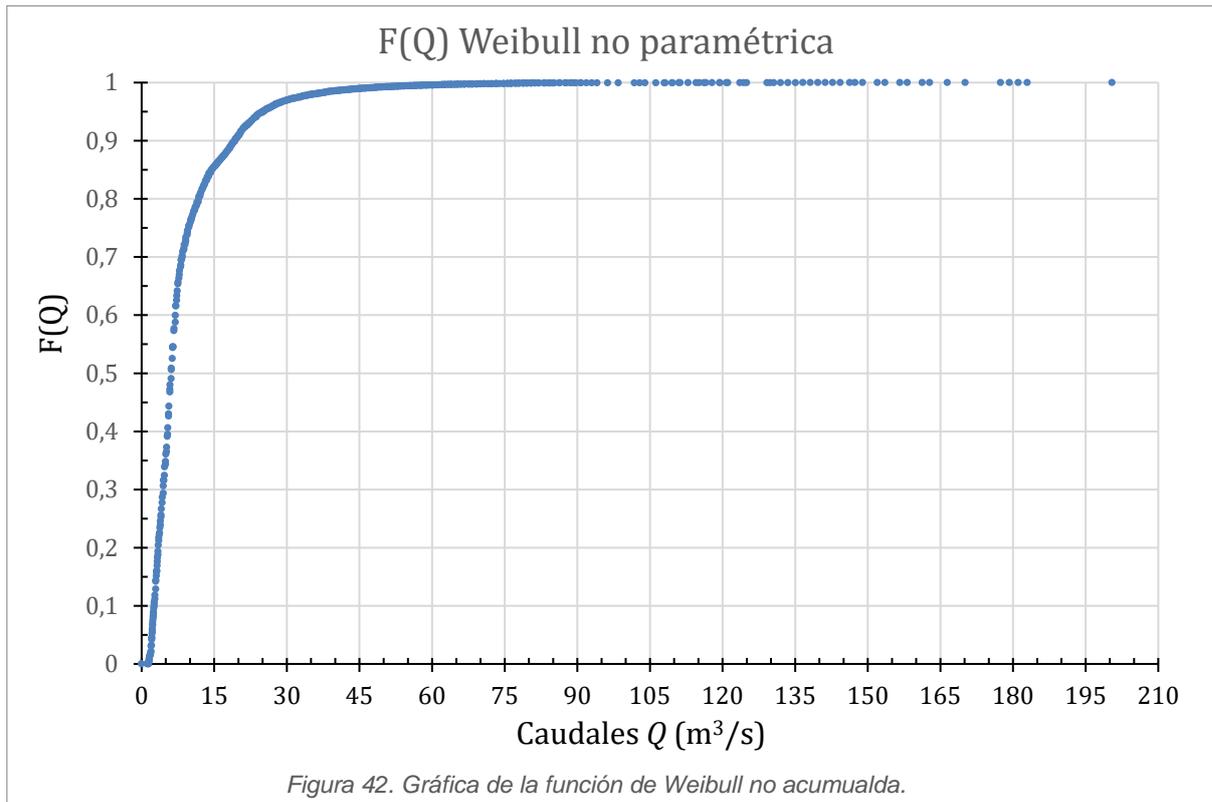
Una vez definidos los conceptos clave necesarios para abordar el estudio del aprovechamiento energético del río, se procede a exponer los resultados obtenidos.

Gráfica de la distribución acumulada

Primero se ha obtenido la gráfica de la distribución acumulada “función de frecuencias acumuladas no paramétrica de Weibull” frente al caudal (o lo que habitualmente se denomina “distribución observada”). Como se ha descrito previamente, se van a utilizar los datos solicitados a la **Confederación Hidrográfica del Ebro** del aforador de Anguiano (A048). Tal y como se observa en la figura 36 (apartado 5.1.), a la salida de la central de Anguiano, por lo tanto, el error cometido es despreciable.

La Confederación Hidrográfica del Ebro disponía de datos horarios históricos desde el 3 de febrero de 2006 a las 17:00 horas hasta el 31 de diciembre de 2018 a las 22:00 horas. Por lo tanto, se manejaron 113142 datos correspondientes a los caudales horarios durante los 13 años. A partir éstos valores se ha obtenido el comportamiento del caudal del río para un año medio.

La gráfica, figura 42, se obtiene a partir de la función de frecuencias acumuladas no paramétrica de Weibull (ecuación 2):



Se observa que el caudal del río nunca ha sido 0 m³/s, por lo que se puede asegurar que existe una probabilidad del 0% de que el caudal sea nulo.

Ahora bien, es preciso modelizar matemáticamente estos datos, con el fin de obtener otras valoraciones de interés.

Ajuste por mínimos cuadrados

Para obtener la distribución acumulada de Weibull, se deben hallar los parámetros que la definen: factor de forma (k) y el factor de escala (c). Para la obtención de ambos parámetros se va a realizar, tal y como ya se ha explicado, el método de ajuste por mínimos cuadrados.

Se han realizado tres ajustes para poder elegir aquel que mejor ajustemos parámetros con el menor error:

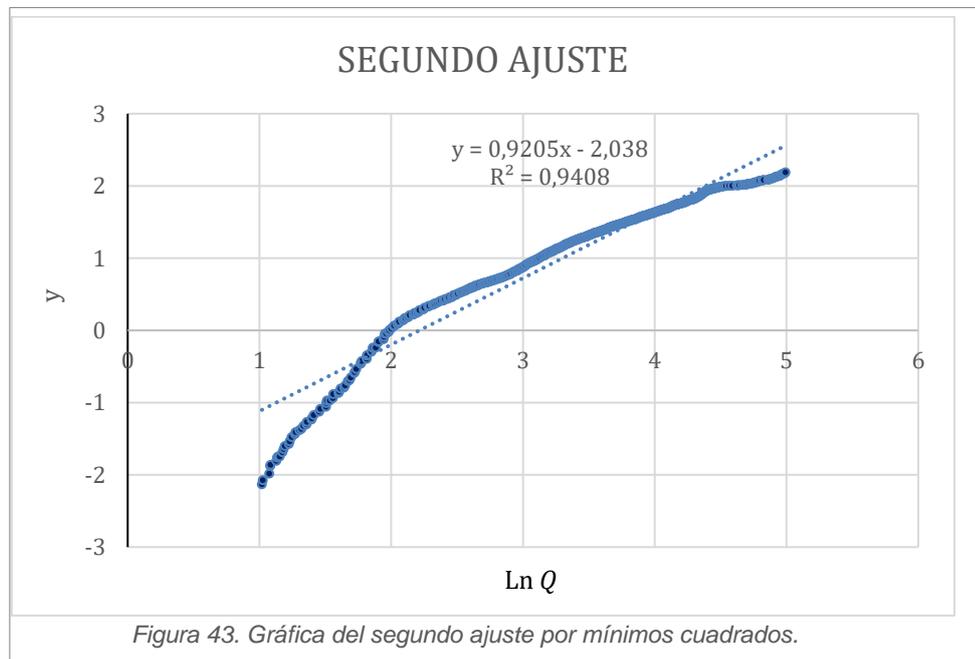
- Primer ajuste: se han utilizado todos los valores
- Segundo ajuste: se han utilizado los valores de caudal que se traducen en valores de x ($\ln Q$) inferiores a 1 y superiores a 5 para tratar de acotar la curva a la zona más lineal.

- Tercer ajuste: se han utilizado los valores de caudal que se traducen en valores de x ($\ln Q$) inferiores a 2 y superiores a 5 para tratar de acotar la curva a la zona más lineal.

Finalmente se ha elegido como mejor el segundo ajuste y es el que se expone a continuación. La primera y la tercera opción de ajuste se pueden revisar en el anexo 3 [AIII].

Segundo ajuste por mínimos cuadrados

Se decidió realizar un segundo ajuste para intentar aproximar mejor los parámetros y reducir el error. Se trató de acotar la curva que se había obtenido en el primer ajuste a la zona más lineal. Para ello se excluyen en el ajuste aquellos valores de caudal que se traduzcan en valores de x ($\ln Q$) inferiores a 1 y superiores a 5.



Se obtiene la siguiente ecuación lineal que ajusta por mínimos cuadrados los valores de caudal:

$$y = 0,9205x - 2,038 \quad (15)$$

Esta recta se puede describir en los términos de la distribución acumulada de Weibull de la siguiente forma:

$$\ln(-\ln(1 - F(Q))) = k \ln Q - k \ln c \quad (16)$$

Se sustituyen los valores obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados:

$$\ln(-\ln(1 - F_{\text{experimental}})) = 0,9205 \ln Q - 2,038 \quad (17)$$

De esta forma, se obtienen los valores del factor de forma (k) y el factor de escala (c):

$$0,9205 \ln Q = k \ln Q \rightarrow \mathbf{k = 0,9205} \quad (18)$$

$$-k \ln c = n \rightarrow c = e^{-\left(\frac{n}{k}\right)} = e^{-\left(\frac{-2,038}{0,9205}\right)} \rightarrow \mathbf{c = 9,1523} \quad (19)$$

Se observa que en este caso el factor de regresión ha aumentado llegando a alcanzar un valor de 0,9408, superior al primer ajuste realizado.

Bondad del ajuste por mínimos cuadrados

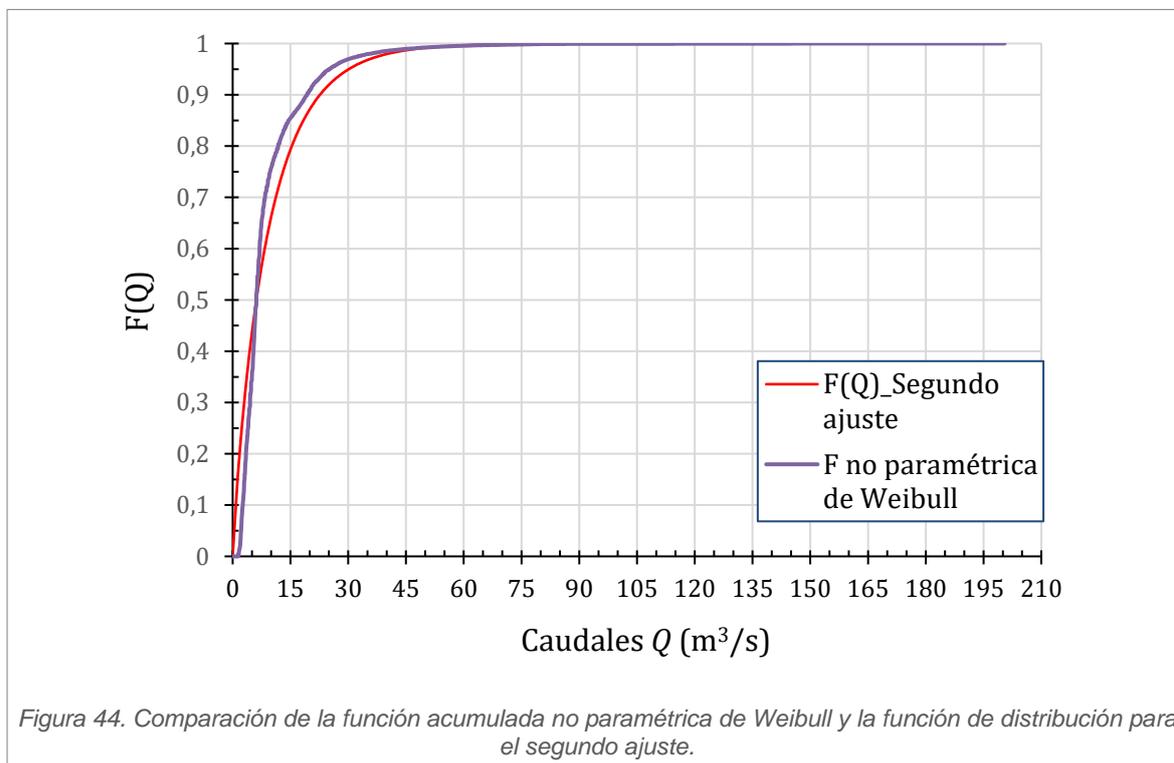
A continuación se expone la bondad del segundo ajuste por mínimos cuadrados. La bondad del primer ajuste y tercer ajuste se pueden revisar en el anexo 4 [\[AIV\]](#).

Bondad del segundo ajuste

Primeramente se ha obtenido la función de distribución con los parámetros del segundo ajuste:

$$F(Q) = 1 - e^{-\left(\frac{Q}{9,1523}\right)^{0,9205}} \quad (20)$$

La figura 44, representa la curva de la función de distribución acumulada de Weibull para el segundo ajuste junto con la curva de distribución acumulada no paramétrica de Weibull.



Para saber qué hipótesis se acepta se debe elegir correctamente de la tabla de distribución Chi Cuadrado. Para ello, es necesario calcular el número de grados de libertad:

$$c = n^{\circ} \text{ de intervalos} - n^{\circ} \text{ de parámetros} - 1 \quad (21)$$

En este caso, tras realizar la frecuencia acumulada de la muestra se ha obtenido que el número de intervalos es 533. Además la función paramétrica de Weibull se determina con dos parámetros:

$$c = 533 - 2 - 1 = 530 \quad (22)$$

Para elegir X_{tabla}^2 se determina que el grado de aceptación es del 95%, es decir, un grado de error del 5%.

$$X_{\text{tabla}}^2 = 584,665 \quad (23)$$

Se ha obtenido: $X_c^2 = 7,945$. Por lo tanto, como $X_c^2 < X_{\text{tabla}}^2$ se acepta la hipótesis H_0 .

Tal y como se observa en el anexo 4 [\[AIV\]](#) se ha aceptado la hipótesis en las tres opciones de ajuste. Por lo tanto, la mejor opción es la segunda porque es en la que más se separa el valor obtenido X_c^2 del valor de la tabla.

Expresión final de la función distribución de Weibull

Por lo tanto, al aceptar el segundo ajuste por mínimos cuadrados también se aceptó que la función de distribución de Weibull que ajusta correctamente a la serie de datos sea:

$$F(Q) = 1 - e^{-\left(\frac{Q}{9,1523}\right)^{0,9205}} \quad (24)$$

A continuación se ha obtenido la probabilidad acumulada del caudal y se ha comparado con los porcentajes obtenidos para los caudales significativos a partir la curva de probabilidades (punto 5.3.).

A partir de las curvas de probabilidades se obtiene el número de días en que un valor de caudal tiene una probabilidad mayor o igual de darse. En cambio, la función de distribución aporta la probabilidad de que la variable caudal tome valores inferiores o iguales al determinado ($F(q) = p(Q \leq q)$). Por lo tanto, para poder comparar ambos

análisis es necesario equiparar los resultados. Para ello se debe modificar la función de distribución de la siguiente manera:

$$F(Q) = 1 - \left(1 - e^{-\left(\frac{Q}{9,1523}\right)^{0,9205}} \right) = e^{-\left(\frac{Q}{9,1523}\right)^{0,9205}} \quad (25)$$

Caudales medios diarios (m ³ /s)	Función distribución		Curva de probabilidades	
	F(Q)	F (Q) (%)	Nº días Q ≥	Porcentaje anual (%)
1,96 (Caudal para el funcionamiento único de G2)	0,7850	78.50	365	100
2,3 (Caudal para el funcionamiento único de G3)	0,7554	75.54	349	95,62
2,54 (Caudal para el funcionamiento único de G1)	0,7354	73.54	334	91,51
4,26 (Caudal para el funcionamiento de G2 + G3)	0,6098	60.98	264	72,33
4,5 (Caudal para el funcionamiento de G1 + G2)	0,5944	59.44	260	71,23
4,84 (Caudal para el funcionamiento de G1 + G3)	0,5733	57.33	248	67,95
6 (Caudal para funcionamiento ideal de los grupos)	0,5076	50.76	199	54,52

Tabla 13. Comparación de los análisis de caudales significativos.

Como se observa existen diferencias significativas para los primeros valores. Sin embargo, esto es lógico debido a que para los valores bajos de caudal el ajuste obtenido era peor (ver figura 44).

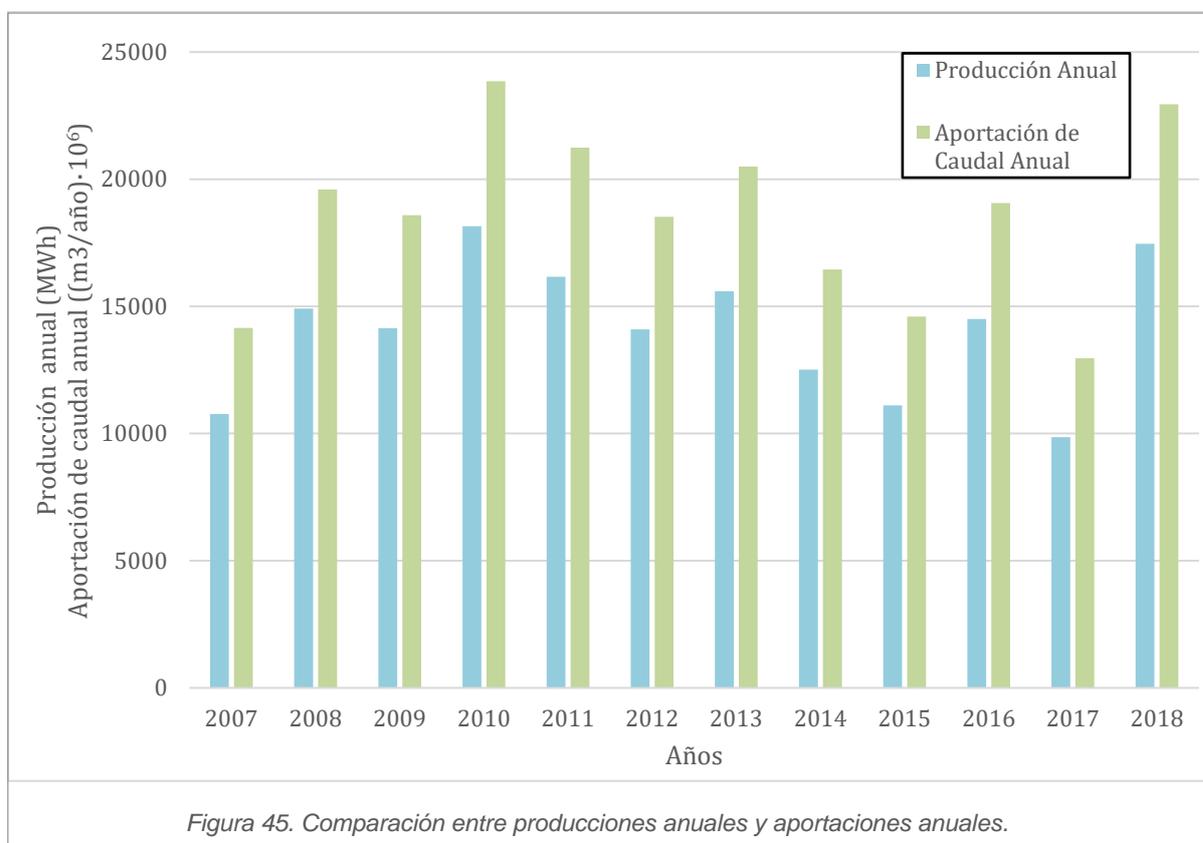
Además, se puede seguir considerando alto el porcentaje de días en los cuales se puede turbinar con los tres grupos.

6. ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA

En la siguiente figura se han representado las producciones anuales y las aportaciones anuales de caudales. Para poder comparar las dos magnitudes es necesario ponerlas en la misma escala, es por ello que el caudal aparece con esas unidades.

Como se puede observar los años de mayor producción corresponden con los años húmedos y los años de menor producción con los años secos (ver punto 5.2.), es decir, existe una correlación directa entre caudales y producciones.

Además, se hace visible la necesidad de regular correctamente el funcionamiento de las turbinas para el correcto aprovechamiento del recurso no solo cuando las aportaciones de caudales son grandes sino especialmente en los casos de escasez de caudal.



7. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN CUADAL-PRODUCCIÓN

Se ha graficado la producción con respecto del caudal para cada año de los que se tienen datos, desde el 2006 hasta el 2018 (anexo 5, [\[AVI\]](#)). De esta forma se ha podido observar la tendencia de cada año y si siguen una tendencia similar. También se ha podido observar si ha existido alguna anomalía para descartar esa región del tiempo que podría distorsionar el modelo de correlación potencia-caudal.

Para suavizar las gráficas, evitar los picos, se ha realizado este estudio con datos diarios.

Como se observa, las curvas de la mayor parte de los años siguen una tendencia lineal hasta aproximadamente 5-6 m³/s. Esto es lógico debido a que como ya se determinó la capacidad máxima del canal es de 5,6 m³/s. A partir de ese caudal la potencia se enclava en su valor máximo. Esto se querido modelizar y se ha aproximado cada a una recta para poder observar con facilidad la tendencia (anexo 6, [\[AVI\]](#)).

Sin embargo, hay alguna excepción. Entre los años 2015 y 2016 también se enclava la producción alrededor de 1000 kWh debido a que se tuvo que reducir la producción entorno a un 50% por la necesidad de realizar reparaciones en uno de los grupos turbina-alternador. Por ello, se va a eliminar este año del modelo ya que podría distorsionar el resultado.

8. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MINICENTRAL DE ANGUIANO

Se ha decidido realizar un ejemplo para demostrar cuál debería ser el régimen de funcionamiento óptimo de las turbinas de la minicentral de Anguiano. Para realizar un ejemplo más cercano a la realidad se han cogido los datos de caudal para un año medio (obtenidos en el punto 5.2.). Se han ordenado los datos de menor a mayor caudal para simular una situación de puesta en marcha de la central desde los menores valores hasta los mayores. Debido a que se tienen los valores de caudales en el aforador y no los entrantes en la central, también ha sido necesario restar el caudal ecológico (0,4 m³/s).

Primeramente, se han separado los valores de caudal en las dos regiones diferenciadas que se apreciaban en el punto 7 ya que el modo de actuar en cada región es diferente:

- En la primera zona lineal, hasta 5,6 m³/s, se debe seleccionar cuál es la turbina que aporta más potencia para los caudales bajos que se tienen y jugar con la apertura de su distribuidor.
- En la segunda zona, la zona saturada a partir de 5,6 m³/s, se debe tratar de hacer funcionar a las turbinas según la forma óptima determinada en las conclusiones obtenidas en los ensayos realizados por Iberdrola Renovables S.A.U. (tabla 11, punto 5.3.)

Por lo tanto, la zona en la que hay que tratar de actuar de la forma más eficiente posible en la región lineal para obtener el máximo aprovechamiento aunque el caudal sea todavía bajo. Por ello, este ejemplo se va a centrar en la primera zona.

Para determinar la zona de funcionamiento de cada turbina hay que tener en cuenta las curvas de rendimiento de las turbinas. Estas curvas se han obtenido gracias a los ensayos realizados por Iberdrola Renovables S.A.U. que han adjuntado en el anexo [\[A2\]](#). Como aporte extra a la información de los ensayos se han obtenido las curvas de tendencia:

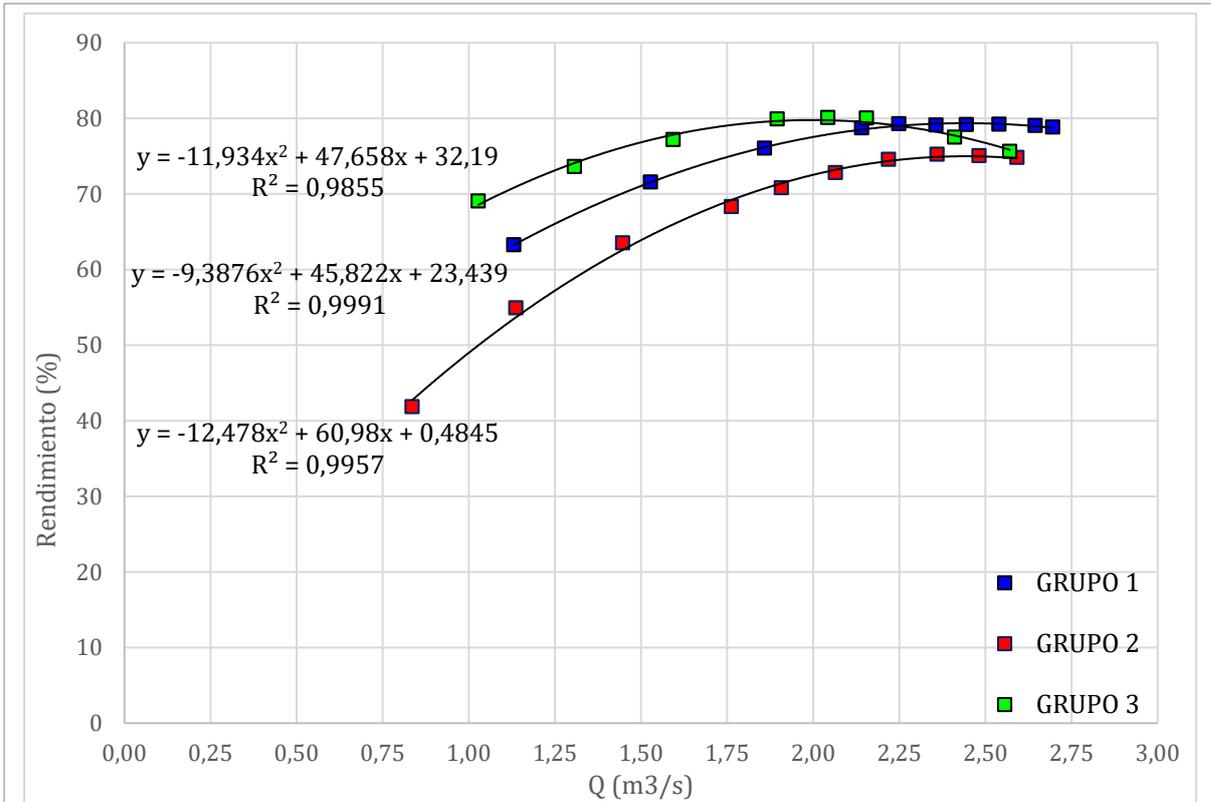


Figura 46. Curvas de rendimiento de las turbinas en función del caudal.

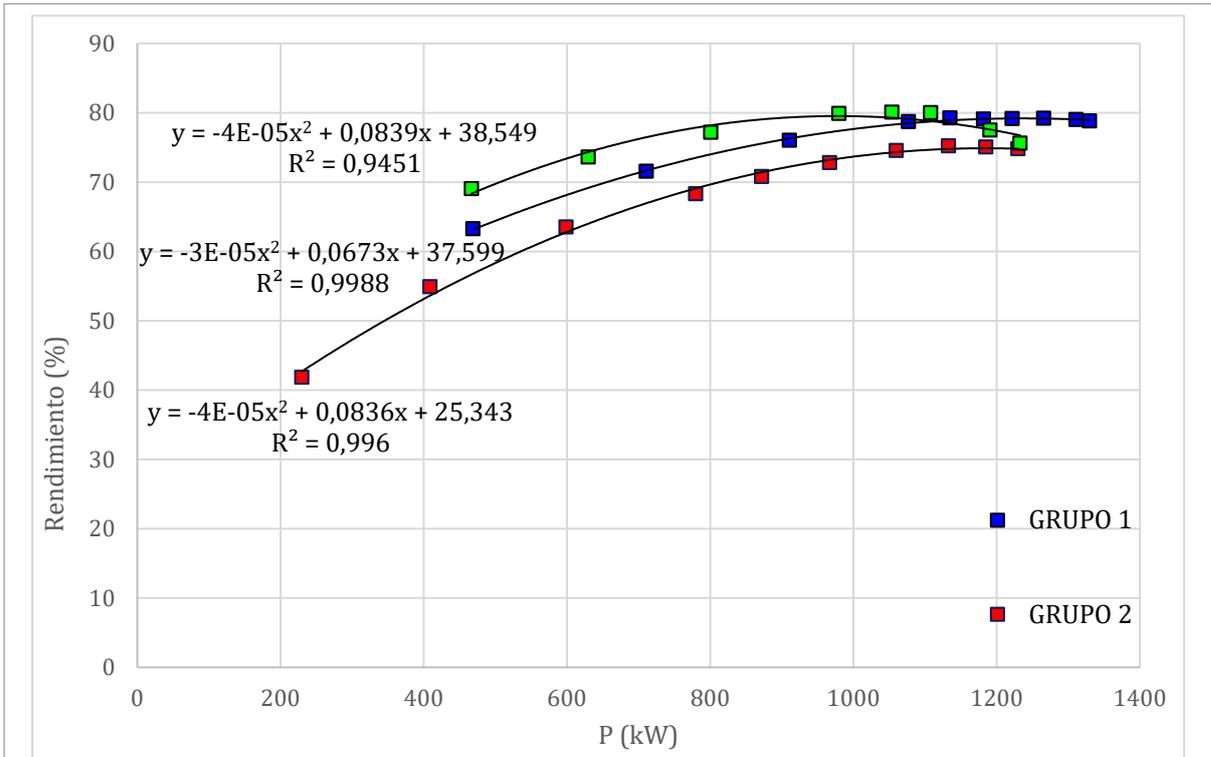


Figura 47. Curvas de rendimiento de las turbinas en función de la potencia.

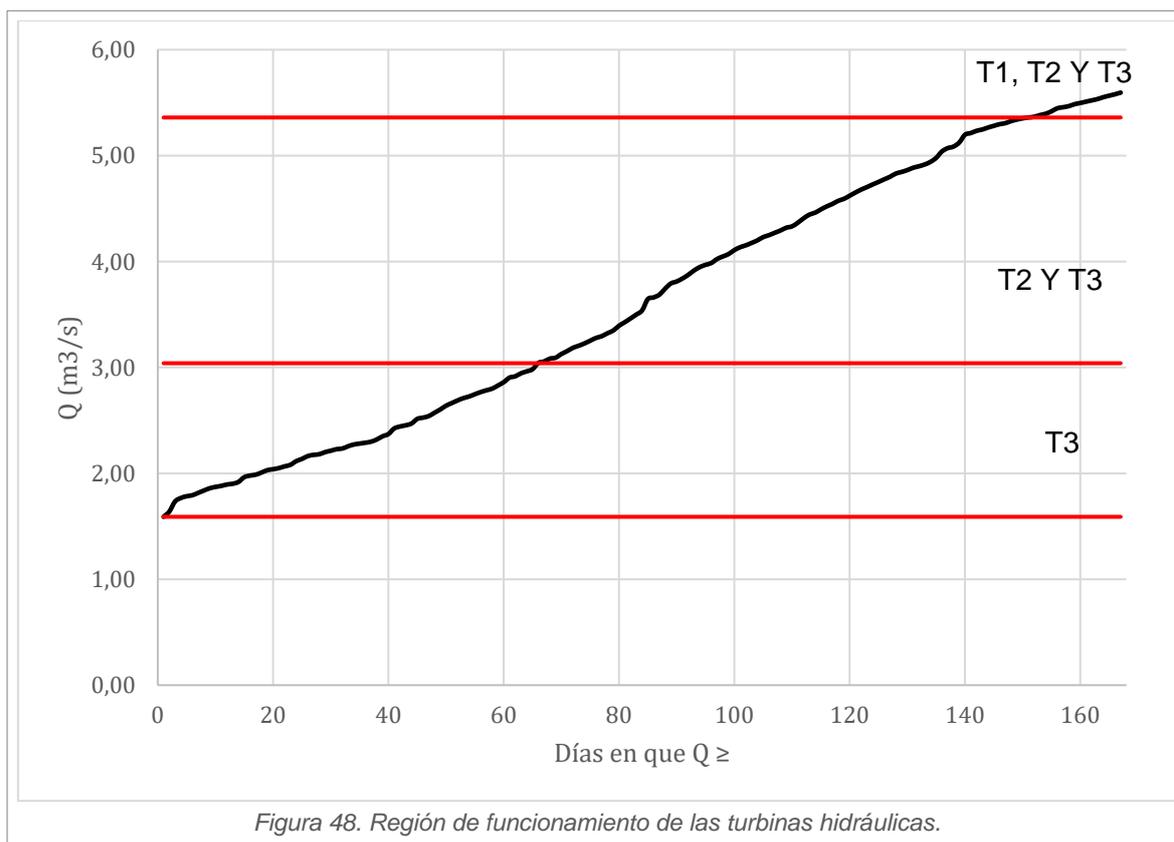
A continuación, se exponen los resultados del ejemplo de puesta en marcha de la minicentral de Anguiano:

Primero se pone en **funcionamiento la turbina 3** ya que, como se ve en la figura 49, para caudales bajos es la que mayor rendimiento y por lo tanto más potencia genera. Comienza a funcionar para un caudal de $1,59 \text{ m}^3/\text{s}$ y una apertura del distribuidor del 60%. Conforme aumente el caudal se irá abriendo más el distribuidor de la turbina 3 hasta que haya suficiente caudal para que comience a funcionar la turbina 2.

El **funcionamiento de la turbina 2** comienza cuando se tiene un caudal de $3,04 \text{ m}^3/\text{s}$. Comenzará a funcionar con una apertura del distribuidor del 40%. En este momento la apertura del distribuidor de la turbina 3 es del 80%. La distribución del caudal es de $2,16 \text{ m}^3/\text{s}$ para la turbina 3 y de $0,88 \text{ m}^3/\text{s}$ para la turbina 2. Conforme aumente el caudal se irá abriendo más el distribuidor de la turbina 2 hasta que haya suficiente caudal para que comience a funcionar la turbina 1. Al final de esta zona, la turbina 2 acaba con una apertura del distribuidor del 80%. Sin embargo, la turbina 3 permanece con la apertura del distribuidor fija durante todo este proceso.

Por último, entra en **funcionamiento la turbina 1** cuando el caudal es de $5,37 \text{ m}^3/\text{s}$. Comenzará a funcionar con una apertura del distribuidor del 40%. En este momento la apertura de los distribuidores de las turbinas 2 y 3 es del 80%. La distribución del caudal es de $2,16 \text{ m}^3/\text{s}$ para la turbina 3 y de $2,08 \text{ m}^3/\text{s}$ para la turbina 2. Este proceso termina cuando el caudal por el canal es el máximo, $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de este punto, como ya se ha explicado previamente, el máximo aprovechamiento del recurso se realiza con una apertura de las turbinas de 70%-64%-70% respectivamente.

En la figura 49, se expone todo lo anteriormente explicado de forma gráfica:



9. CONCLUSIONES

Para concluir con este trabajo es importante remarcar los principales objetivos que se han alcanzado durante todo el proceso.

Primeramente, se ha llevado a cabo el estudio de las **frecuencias de caudales del río Najerilla** a partir de tres estudios: curvas de caudales clasificados, curvas de probabilidad y análisis estadístico de Weibull.

Gracias a las **curvas de caudales clasificados** se ha caracterizado hidrológicamente el río Najerilla a su paso por el aforador de Anguiano concluyendo lo siguiente:

- Se trata de un río permanente, es decir, que no se seca a lo largo del año a pesar de que su régimen de caudales es muy variable (Su caudal mínimo al 50% de probabilidad es Q_{365} o $Q_{\text{mínimo}}=2,3 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Se ha obtenido el que podría ser el caudal ecológico $Q_{330}=2,72 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, el caudal ecológico que fija la Confederación Hidrográfica del Ebro para el río Najerilla en el aforador de Anguiano es de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal asegurado en el azud de Anguiano con la escala salmonera).
- Se ha determinado el caudal de equipamiento Q_e , caudal para conseguir que el volumen turbinado sea máximo, que está en el intervalo de la curva comprendido entre el Q_{80} y el Q_{100} . Por lo tanto, se ha seleccionado el Q_{90} que se corresponde con el valor medio del intervalo: $Q_e= 10,36 \text{ m}^3/\text{s}$. Cabe destacar que este caudal es aproximadamente el doble de lo máximo que se puede turbinar en Anguiano. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la instalación se construyó en 1921 con el estudio hidrológico de la época.

Con las **curvas de probabilidad** y el **análisis estadístico de Weibull** se puede deducir la probabilidad de los valores de caudal significativos del régimen de flujo del río. Para este estudio los valores significativos de caudales son aquellos que ponen en marcha las diferentes turbinas. Gracias a la comparación realizada de ambos estudios se puede concluir lo siguiente:

- Las discrepancias entre los resultados para bajos caudales se deben al error en la aproximación a partir de Weibull de la distribución observada.
- La turbina 2 va a estar en funcionamiento la mayor parte del año.
- El caudal máximo del canal $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ con el que se obtiene la máxima potencia se da en torno al 50% del año.

Por último, para **correlacionar el caudal medido en el río Najerilla con la producción de la minicentral hidráulica de Anguiano** se han obtenido las curvas de potencia frente a caudal para cada año. Como era de esperar, debido a la propia limitación del volumen máximo del canal, las curvas han presentado dos tramos: uno lineal creciente y otro lineal horizontal, en el que se ha saturado la capacidad de generar potencia.

Gracias a los ensayos realizados por Iberdrola Renovables S.A.U. se sabe cómo actuar en la zona saturada (70%-64%-70%). Sin embargo, quedaba por caracterizar la primera zona lineal creciente. Para ello se han utilizado las curvas de rendimiento frente a caudal y potencia de las turbinas y se ha realizado un ejemplo de actuación. Gracias a este ejemplo, se puede concluir que es especialmente importante actuar de forma eficiente en este primer tramo, lineal creciente, ya que se debe extraer el máximo potencial de producción para caudales bajos.

10. LÍNEAS FUTURAS

Las líneas futuras que se pueden abordar a partir de las conclusiones de este trabajo se pueden plantear desde dos puntos de vista: mejorar el análisis de la minicentral de Anguiano y extender el análisis a otras minicentrales.

En la primera línea, para mejorar el comportamiento de la minicentral de Anguiano se propone:

- Sustituir las dos tuberías forzadas por una única que evite las grandes pérdidas de carga tanto en las tuberías como en el anillo que las une.
- Mejorar la explotación del recurso para caudales bajos a través de un modelo que siga las curvas de rendimiento. Habría que utilizar las ecuaciones de las curvas de rendimiento aportadas en el apartado 8.

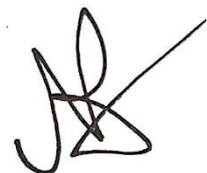
En cuanto a la segunda, para extender el análisis a otras minicentrales se propone:

- El aforador de Anguiano es el que se ha utilizado para la minicentral del presente trabajo. Sin embargo, en el río Najerilla existen 3 aforadores a lo largo del mismo en el siguiente orden: aforador de Mansilla, **aforador de Anguiano** y aforador de Torremontalbo. Sería conveniente realizar el mismo análisis de frecuencia de caudales que se ha realizado en este trabajo y asociarlo a las distintas minicentrales:
 - Aforador de Mansilla (A034): Minicentral de Mansilla
 - Aforador de Anguiano (A048): Minicentral de Cuevas y Minicentral de La Retorna
 - Aforador de Torremontalbo (A038): Minicentral de Najerilla
- El primer paso más sencillo para la continuación de este estudio sería analizar la minicentral de Cuevas que se encuentra aguas abajo de la minicentral de Anguiano ya que se podrían utilizar los datos del mismo aforador.
- También se prevee una posible extrapolación a minicentrales en la cuenca del Ebro.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] “Estadísticas de energía renovable.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/es&oldid=401182. [Accessed: 27-May-2019].
- [2] Red Eléctrica España, “Las energías renovables en el sistema eléctrico español, 2017,” 2017.
- [3] A. L. Wenden and IDAE, “MINICENTRALES HIDROELÉCTRICAS,” vol. 3, no. September, 1981.
- [4] J. García, “CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS,” 2012.
- [5] H. del E. Confederación, “PLAN HIDROLOGICO DE LOS RIOS NAJERILLA Y ZAMACA,” 2007.
- [6] H. del E. Confederación, “Subcuenca del río Najerilla.”
- [7] “Fauna de rios - Medio ambiente - Official Portal of Government of La Rioja.” [Online]. Available: <https://www.larioja.org/medio-ambiente/en/biodiversidad/fauna-rioja/fauna-rios>. [Accessed: 26-May-2019].
- [8] “SAIH Ebro. Datos: Ficha A048.” [Online]. Available: <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:A048>. [Accessed: 26-May-2019].
- [9] C.-D. Lai, *Generalized Weibull Distributions (SpringerBriefs in Statistics)*. 2013.

Pamplona a 31 de Mayo de 2019



Nerea Arriazu Ramos

ANEXOS

ÍNDICE DE CONTENIDO ANEXOS

ANEXO I: MAPAS DE LA CUENCA DEL NAJERILLA.....	1
ANEXO II: ENSAYOS REALIZADOS EN LA MINICENTRAL DE ANGUIANO	3
ANEXO III: AJUSTES POR MÍNIMOS CUADRADOS	6
ANEXO IV: BONDAD DE LOS AJUSTES POR MÍNIMOS CUADRADOS	8
ANEXO V: CURVAS DE POTENCIA CON RESPECTO CAUDAL	11
ANEXO VI: MODELIZACIÓN CURVAS DE PRODUCCIÓN CON RESPECTO CAUDAL....	24

ÍNDICE DE FIGURAS ANEXOS

Figura AI. 1. Cuenca del Najerilla. Fuente: Subcuenca del río Najerilla, Confederación Hidrográfica del Ebro.	1
Figura AI. 2. Situación de las estaciones de aforos del río Najerilla. Fuente: Plan hidrológico de los ríos Najerilla y Zamaca.	2
Figura AIII. 1. Gráfica del primer ajuste por mínimos cuadrados.	6
Figura AIII. 2. Gráfica del tercer ajuste por mínimos cuadrados	7
Figura AIV. 1. Comparación de la función acumulada no paramétrica de Weibull y la función de distribución para el primer ajuste.	8
Figura AIV. 2. Comparación de la función acumulada no paramétrica de Weibull y la función de distribución para el tercer ajuste.	9
Figura AV. 1. Curva Producción VS Caudal del año 2006	11
Figura AV. 2. Curva Producción VS Caudal del año 2006 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	11
Figura AV. 3. Curva Producción VS Caudal del año 2006 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	11
Figura AV. 4. Curva Producción VS Caudal del año 2007.	12
Figura AV. 5. Curva Producción VS Caudal del año 2007 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	12
Figura AV. 6. Curva Producción VS Caudal del año 2007 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	12
Figura AV. 7. Curva Producción VS Caudal del año 2008	13
Figura AV. 8. Curva Producción VS Caudal del año 2008 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	13
Figura AV. 9. Curva Producción VS Caudal del año 2008 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	13
Figura AV. 10. Curva Producción VS Caudal del año 2009	14
Figura AV. 11. Curva Producción VS Caudal del año 2009 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	14

Figura AV. 12. Curva Producción VS Caudal del año 2009 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	14
Figura AV. 13. Curva Producción VS Caudal del año 2010	15
Figura AV. 14. Curva Producción VS Caudal del año 2010 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	15
Figura AV. 15. Curva Producción VS Caudal del año 2010 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	15
Figura AV. 16. Curva Producción VS Caudal del año 2011	16
Figura AV. 17. Curva Producción VS Caudal del año 2011 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	16
Figura AV. 18. Curva Producción VS Caudal del año 2011 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	16
Figura AV. 19. Curva Producción VS Caudal del año 2012	17
Figura AV. 20. Curva Producción VS Caudal del año 2012 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	17
Figura AV. 21. Curva Producción VS Caudal del año 2012 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	17
Figura AV. 22. Curva Producción VS Caudal del año 2013	18
Figura AV. 23. Curva Producción VS Caudal del año 2013 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	18
Figura AV. 24. Curva Producción VS Caudal del año 2013 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	18
Figura AV. 25. Curva Producción VS Caudal del año 2014	19
Figura AV. 26. Curva Producción VS Caudal del año 2014 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	19
Figura AV. 27. Curva Producción VS Caudal del año 2014 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	19
Figura AV. 28. Curva Producción VS Caudal del año 2015	20
Figura AV. 29. Curva Producción VS Caudal del año 2015 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	20
Figura AV. 30. Curva Producción VS Caudal del año 2015 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	20
Figura AV. 31. Curva Producción VS Caudal del año 2016	21
Figura AV. 32. Curva Producción VS Caudal del año 2016 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	21
Figura AV. 33. Curva Producción VS Caudal del año 2016 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	21
Figura AV. 34. Curva Producción VS Caudal del año 2017	22
Figura AV. 35. Curva Producción VS Caudal del año 2017 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	22
Figura AV. 36. Curva Producción VS Caudal del año 2017 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	22
Figura AV. 37. Curva Producción VS Caudal del año 2018	23
Figura AV. 38. Curva Producción VS Caudal del año 2018 para caudales inferiores a 6 m ³ /s.....	23
Figura AV. 39. Curva Producción VS Caudal del año 2018 para caudales superiores a 6 m ³ /s.....	23

ÍNDICE DE TABLAS ANEXOS

Tabla AII. 1. Mediciones realizadas para el grupo número 1 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 40% al 75%.	3
Tabla AII. 2. Mediciones realizadas para el grupo número 1 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 80% al 100%.	3
Tabla AII. 3. Mediciones realizadas para el grupo número 2 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 40% al 75%.	4
Tabla AII. 4. Mediciones realizadas para el grupo número 2 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 80% al 100%.	4
Tabla AII. 5. Mediciones realizadas para el grupo número 3 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 40% al 80%.	5
Tabla AII. 5. Mediciones realizadas para el grupo número 3 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 75% al 100%.	5
Tabla AVI. 1. Modelización de las curvas producción frente a caudal	25

ANEXO I: MAPAS DE LA CUENCA DEL NAJERILLA

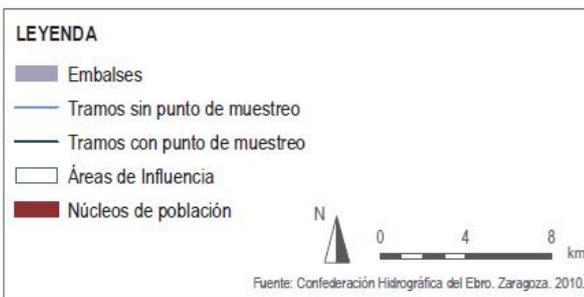
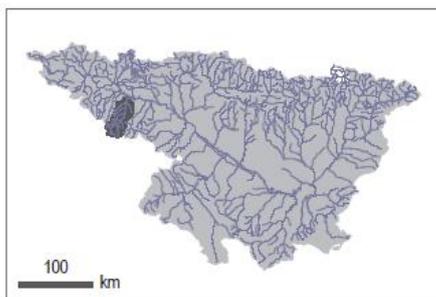
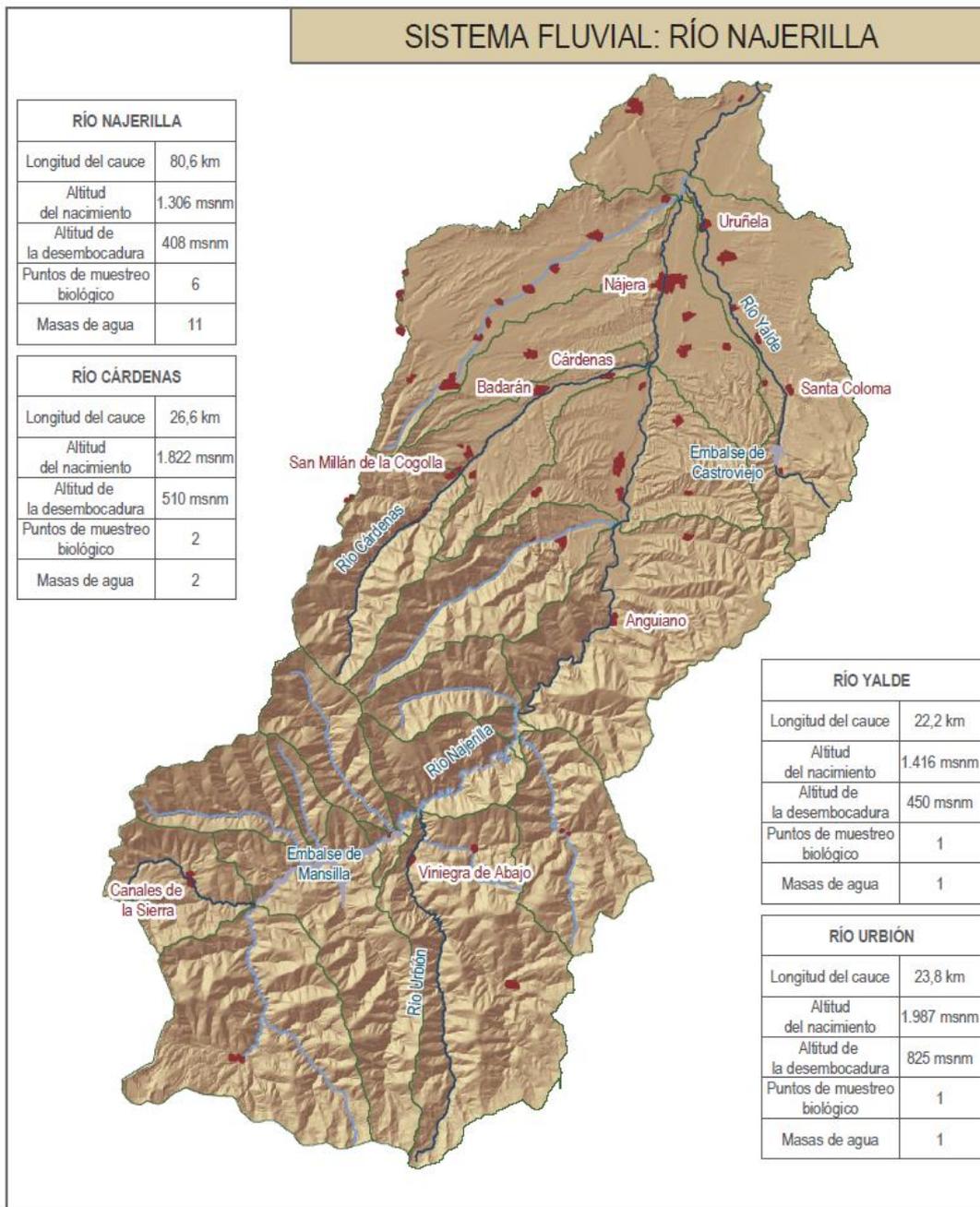


Figura A1. 1. Cuenca del Najerilla. Fuente: Subcuenca del río Najerilla, Confederación Hidrográfica del Ebro.

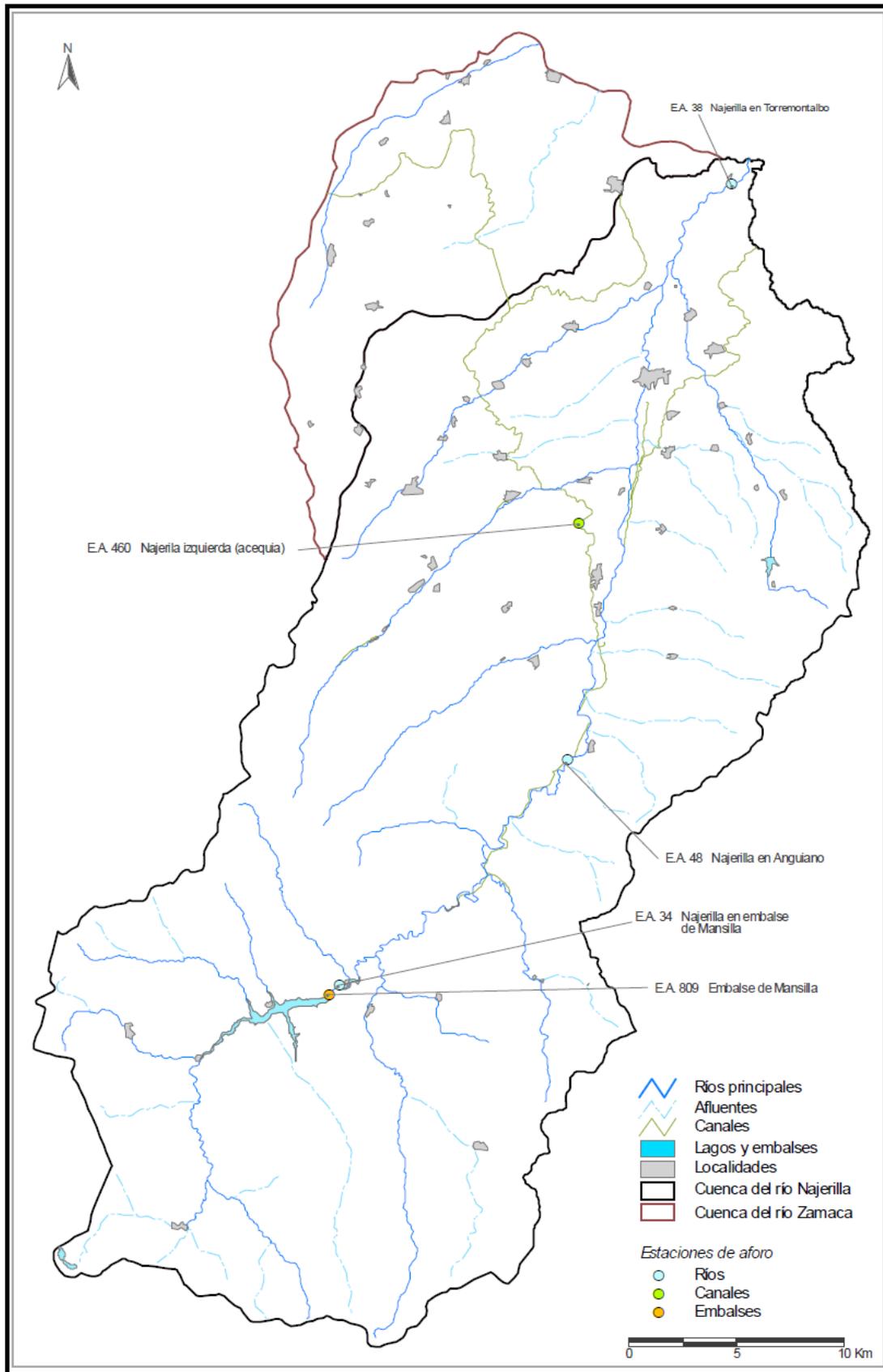


Figura A1. 2. Situación de las estaciones de aforos del río Najerilla. Fuente: Plan hidrológico de los ríos Najerilla y Zamaca.

ANEXO II: ENSAYOS REALIZADOS EN LA MINICENTRAL DE ANGUIANO

En los cuadros que aparecen a continuación se pueden ver los resultados más importantes de las pruebas realizadas por Iberdrola Renovables S.A.U.

MEDICIONES REALIZADAS PARA EL GRUPO NÚMERO 1 DEL SALTO DE ANGUIANO:

Ensayo N°			1	2	3	4	5
	Hora		15:35	16:00	16:20	16:40	17:00
C_D	Cota depósito carga	m	162,462	162,441	162,416	162,386	162,371
Z_s	Cota desagüe	m	95,058	95,103	95,143	95,178	95,183
L	Apertura distribuidor	%	40	50	60	70	75
Δh	Dif. Presión C. espiral	mm Hg	28,0	49,3	73,0	97,0	107,5
Q_M	Caudal medido	m ³ /s	1,131	1,528	1,859	2,141	2,249
Q_T	Caudal turbinado	m ³ /s	1,131	1,528	1,859	2,141	2,249
P_e/γ	Presión estática	m	61,17	60,36	59,44	58,53	58,13
S_e	Sección de entrada	m ²	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379
$V_e^2/2g$	Energía de entrada	m	0,453	0,827	1,224	1,623	1,792
S_s	Sección de salida	m ²	1,064	1,221	1,361	1,483	1,500
$V_s^2/2g$	Energía de salida	m	0,057	0,079	0,095	0,106	0,114
H_B	Salto bruto	m	67,404	67,338	67,273	67,208	67,188
H_N	Salto neto	m	66,757	66,253	65,677	65,125	64,875
	Q^2 (caudal medido)		1,281	2,337	3,458	4,585	5,061
Δh_{tub}	Pérdidas de carga tuberías	m	0,588	1,004	1,500	1,976	2,197
Δh_{tot}	Pérdidas de carga totales	m	0,646	1,084	1,595	2,082	2,312
P_a	Potencia alternador	kW	469	711	911	1077	1135
η	Rendimiento total	%	63,26	71,55	76,03	78,72	79,26

Tabla AII. 1. Mediciones realizadas para el grupo número 1 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 40% al 75%.

Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

Ensayo N°			6	7	8	9	10
	Hora		17:20	17:40	18:00	18:20	18:40
C_D	Cota depósito carga	m	162,356	162,349	162,332	162,321	162,316
Z_s	Cota desagüe	m	95,198	95,203	95,213	95,218	95,228
L	Apertura distribuidor	%	80	85	90	95	100
Δh	Dif. Presión C. espiral	mm Hg	120,1	129,0	139,0	151,0	157,4
Q_M	Caudal medido	m ³ /s	2,357	2,445	2,540	2,645	2,696
Q_T	Caudal turbinado	m ³ /s	2,357	2,445	2,540	2,645	2,696
P_e/γ	Presión estática	m	57,71	57,32	56,94	56,53	56,33
S_e	Sección de entrada	m ²	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379
$V_e^2/2g$	Energía de entrada	m	1,967	2,117	2,285	2,478	2,574
S_s	Sección de salida	m ²	1,553	1,570	1,605	1,622	1,657
$V_s^2/2g$	Energía de salida	m	0,117	0,123	0,127	0,135	0,134
H_B	Salto bruto	m	67,158	67,146	67,119	67,103	67,088
H_N	Salto neto	m	64,617	64,354	64,134	63,909	63,795
	Q^2 (caudal medido)		5,555	5,978	6,454	6,999	7,270
Δh_{tub}	Pérdidas de carga tuberías	m	2,422	2,657	2,856	3,058	3,157
Δh_{tot}	Pérdidas de carga totales	m	2,540	2,781	2,984	3,193	3,292
P_a	Potencia alternador	kW	1182	1222	1266	1311	1330
η	Rendimiento total	%	79,10	79,15	79,20	79,03	78,81

Tabla AII. 2. Mediciones realizadas para el grupo número 1 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 80% al 100%.

Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

MEDICIONES REALIZADAS PARA EL GRUPO NÚMERO 2 DEL SALTO DE ANGUIANO:

Ensayo N°			1	2	3	4	5
	Hora		17:50	18:10	18:30	18:50	19:10
C_D	Cota depósito carga	m	162,486	162,461	162,440	162,416	162,401
Z_s	Cota desagüe	m	95,179	95,229	95,264	95,299	95,319
L	Apertura distribuidor	%	40	50	60	70	75
Δh	Dif. Presión C. espiral	mm Hg	13,6	25,2	40,8	60,6	71,0
Q_M	Caudal medido	m ³ /s	0,836	1,137	1,447	1,763	1,908
Q_T	Caudal turbinado	m ³ /s	0,836	1,137	1,447	1,763	1,908
P_e/γ	Presión estática	m	61,75	61,34	60,79	60,08	59,72
S_e	Sección de entrada	m ²	0,382	0,382	0,382	0,382	0,382
$V_e^2/2g$	Energía de entrada	m	0,243	0,450	0,729	1,082	1,267
S_s	Sección de salida	m ²	0,820	0,994	1,116	1,238	1,308
$V_s^2/2g$	Energía de salida	m	0,052	0,066	0,085	0,103	0,108
H_B	Salto bruto	m	67,307	67,232	67,176	67,117	67,082
H_N	Salto neto	m	67,019	65,738	65,418	65,011	65,807
	Q^2 (caudal medido)		0,699	1,294	2,094	3,109	3,640
Δh_{tub}	Pérdidas de carga tuberías	m	0,234	0,426	0,671	1,002	1,165
Δh_{tot}	Pérdidas de carga totales	m	0,287	0,493	0,757	1,105	1,274
P_a	Potencia alternador	kW	230	409	599	780	872
η	Rendimiento total	%	41,83	54,91	63,51	68,30	70,79

Tabla All. 3. Mediciones realizadas para el grupo número 2 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 40% al 75%.

Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

Ensayo N°			6	7	8	9	10
	Hora		19:30	19:50	20:10	20:30	20:50
C_D	Cota depósito carga	m	162,386	162,366	162,351	162,336	162,322
Z_s	Cota desagüe	m	95,339	95,359	95,369	95,374	95,384
L	Apertura distribuidor	%	80	85	90	95	100
Δh	Dif. Presión C. espiral	mm Hg	83,2	96,0	109,0	120,0	131,0
Q_M	Caudal medido	m ³ /s	2,065	2,219	2,360	2,482	2,592
Q_T	Caudal turbinado	m ³ /s	2,065	2,219	2,360	2,482	2,592
P_e/γ	Presión estática	m	59,27	56,80	58,36	57,96	57,58
S_e	Sección de entrada	m ²	0,382	0,382	0,382	0,382	0,382
$V_e^2/2g$	Energía de entrada	m	1,485	1,715	1,939	2,145	2,340
S_s	Sección de salida	m ²	1,378	1,448	1,483	1,500	1,535
$V_s^2/2g$	Energía de salida	m	0,114	0,119	0,129	0,139	0,145
H_B	Salto bruto	m	67,047	67,007	66,982	66,962	66,938
H_N	Salto neto	m	65,546	65,287	65,043	64,834	64,641
	Q^2 (caudal medido)		4,267	4,927	5,571	6,162	6,723
Δh_{tub}	Pérdidas de carga tuberías	m	1,386	1,599	1,309	1,987	2,151
Δh_{tot}	Pérdidas de carga totales	m	1,500	1,719	1,938	2,127	2,297
P_a	Potencia alternador	kW	967	1060	1133	1185	1230
η	Rendimiento total	%	72,80	74,55	75,22	75,05	74,80

Tabla All. 4. Mediciones realizadas para el grupo número 2 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 80% al 100%.

Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

MEDICIONES REALIZADAS PARA EL GRUPO NÚMERO 3 DEL SALTO DE ANGUIANO:

Ensayo N°			1	2	3	4	5
	Hora		11:05	11:35	11:55	12:20	12:45
C _D	Cota depósito carga	m	162,475	162,451	162,431	162,406	162,376
Z _s	Cota desagüe	m	95,018	95,048	95,088	95,118	95,143
L	Apertura distribuidor	%	40	50	60	70	80
Δh	Dif. Presión C. espiral	mm Hg	21,0	32,8	46,0	68,6	88,5
Q _M	Caudal medido	m ³ /s	1,028	1,307	1,594	1,896	2,155
Q _T	Caudal turbinado	m ³ /s	1,028	1,307	1,594	1,896	2,155
P _e /γ	Presión estática	m	61,26	60,68	59,96	59,04	58,12
S _e	Sección de entrada	m ²	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319
V _e ² /2g	Energía de entrada	m	0,526	0,851	1,265	1,790	2,313
S _s	Sección de salida	m ²	0,968	1,073	1,214	1,320	1,408
V _s ² /2g	Energía de salida	m	0,057	0,075	0,087	0,105	0,119
H _B	Salto bruto	m	67,457	67,403	67,343	67,288	67,233
H _N	Salto neto	m	67,015	66,711	65,356	65,918	65,476
	Q ² (caudal medido)		1,058	1,710	2,542	3,597	4,646
Δh _{tub}	Pérdidas de carga tuberías	m	0,384	0,615	0,898	1,264	1,637
Δh _{tot}	Pérdidas de carga totales	m	0,441	0,691	0,985	1,369	1,756
P _a	Potencia alternador	kW	467	630	801	980	1108
η	Rendimiento total	%	69,04	73,60	77,17	79,90	80,02

Tabla All. 5. Mediciones realizadas para el grupo número 3 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 40% al 80%.

Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

Ensayo N°			6	7	8	9	10
	Hora		15:30	15:50	16:10		
C _D	Cota depósito carga	m	162,395	162,356	162,334		
Z _s	Cota desagüe	m	95,133	95,168	95,188		
L	Apertura distribuidor	%	75	90	100		
Δh	Dif. Presión C. espiral	mm Hg	79,0	110,5	124,0		
Q _M	Caudal medido	m ³ /s	2,043	2,411	2,571		
Q _T	Caudal turbinado	m ³ /s	2,043	2,411	2,571		
P _e /γ	Presión estática	m	58,50	57,06	56,37		
S _e	Sección de entrada	m ²	0,319	0,319	0,319		
V _e ² /2g	Energía de entrada	m	2,079	2,895	3,293		
S _s	Sección de salida	m ²	1,372	1,496	1,566		
V _s ² /2g	Energía de salida	m	0,112	0,132	0,137		
H _B	Salto bruto	m	67,262	67,188	67,146		
H _N	Salto neto	m	65,644	64,960	64,641		
	Q ² (caudal medido)		4,176	5,815	6,614		
Δh _{tub}	Pérdidas de carga tuberías	m	1,504	2,094	2,366		
Δh _{tot}	Pérdidas de carga totales	m	1,617	2,227	2,504		
P _a	Potencia alternador	kW	1054	1191	1233		
η	Rendimiento total	%	80,09	77,49	75,60		

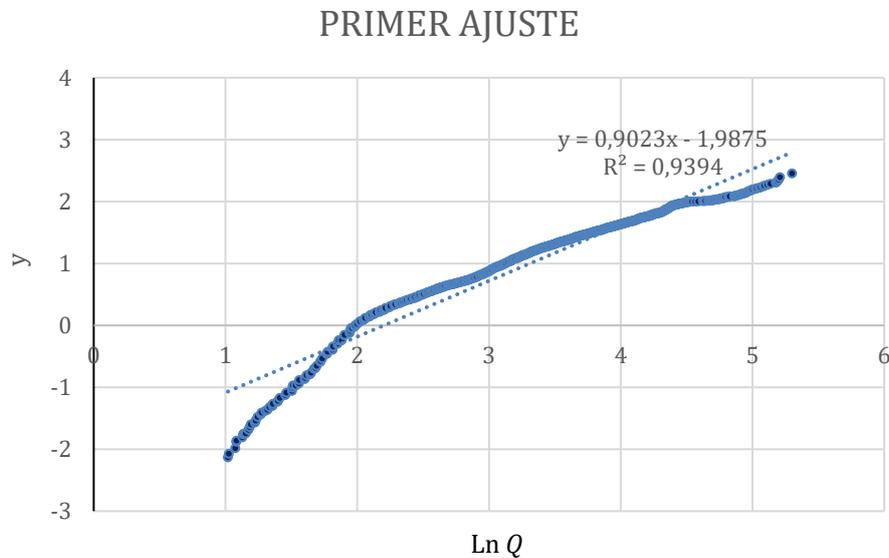
Tabla All. 6. Mediciones realizadas para el grupo número 3 del salto de Anguiano para aperturas del distribuidor del 75% al 100%.

Fuente: Iberdrola Renovables S.A.U

ANEXO III: AJUSTES POR MÍNIMOS CUADRADOS

A continuación se exponen los resultados de los ajustes por mínimos cuadrados, primer ajuste y tercer ajuste, que fueron rechazados.

Primer ajuste por mínimos cuadrados:



Se obtiene la siguiente ecuación lineal que ajusta por mínimos cuadrados los valores de caudal:

$$y = 0,9023x - 1,9875 \quad (1)$$

Esta recta se puede describir en los términos de la distribución acumulada de Weibull de la siguiente forma:

$$\ln(-\ln(1 - F(Q))) = k \ln Q - k \ln c \quad (2)$$

Se sustituyen los valores obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados:

$$\ln(-\ln(1 - F_{\text{experimental}})) = 0,9023 \ln Q - 1,9875 \quad (3)$$

De esta forma, se obtienen los valores del factor de forma (k) y el factor de escala (c):

$$0,9023 \ln Q = k \ln Q \rightarrow \mathbf{k = 0,9023} \quad (4)$$

$$-k \ln c = n \rightarrow c = e^{-\left(\frac{n}{k}\right)} = e^{-\left(\frac{-1,9875}{0,9023}\right)} \rightarrow \mathbf{c = 9,049} \quad (5)$$

Tal y como se observa, en el ajuste se ha cometido un cierto error ya que el coeficiente de regresión obtenido es $R^2 = 0,9394$

Tercer ajuste por mínimos cuadrados

Se ha decidido realizar un tercer ajuste para intentar aproximar todavía mejor los parámetros y reducir el error. Se va a tratar de acotar la curva a la zona más lineal. Para ello se excluyen en el ajuste aquellos valores de caudal que se traduzcan en valores de x ($\ln Q$) inferiores a 2 y superiores a 5.

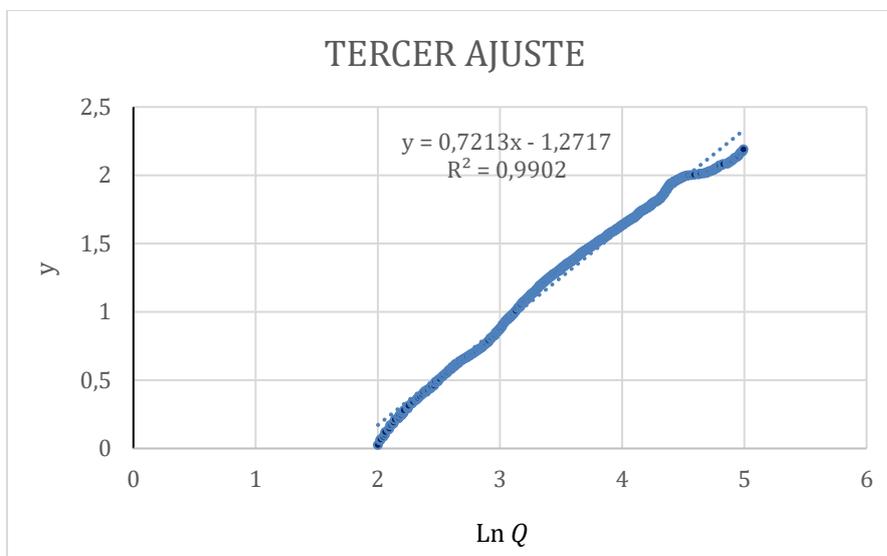


Figura AIII. 2. Gráfica del tercer ajuste por mínimos cuadrados

Se obtiene la siguiente ecuación lineal que ajusta por mínimos cuadrados los valores de caudal:

$$y = 0,7213x - 1,2717 \quad (6)$$

Esta recta se puede describir en los términos de la distribución acumulada de Weibull de la siguiente forma:

$$\ln(-\ln(1 - F(Q))) = k \ln Q - k \ln c \quad (7)$$

Se sustituyen los valores obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados:

$$\ln(-\ln(1 - F_{\text{experimental}})) = 0,7213 \ln Q - 1,2717 \quad (8)$$

De esta forma, se obtienen los valores del factor de forma (k) y el factor de escala (c):

$$0,7213 \ln Q = k \ln Q \rightarrow k = 0,7213 \quad (9)$$

$$-k \ln c = n \rightarrow c = e^{-\left(\frac{n}{k}\right)} = e^{-\left(\frac{-1,2717}{0,7213}\right)} \rightarrow c = 5,8303 \quad (10)$$

Se observa que en este caso el factor de regresión ha aumentado con respecto a los anteriores llegando a alcanzar un valor de 0,9902.

ANEXO IV: BONDAD DE LOS AJUSTES POR MÍNIMOS CUADRADOS

Como ya se ha determinado, se ha elegido como mejor ajuste el segundo. A continuación, se expone el cálculo de la bondad de la primera y la tercera opción de ajuste.

Bondad del primer ajuste

Primeramente se obtiene la función de distribución con los parámetros del primer ajuste:

$$F(Q) = 1 - e^{-\left(\frac{Q}{9,049}\right)^{0,9023}} \quad (1)$$

La figura 1, representa la curva de la función de distribución acumulada de Weibull para el primer ajuste junto con la curva de distribución acumulada no paramétrica de Weibull.

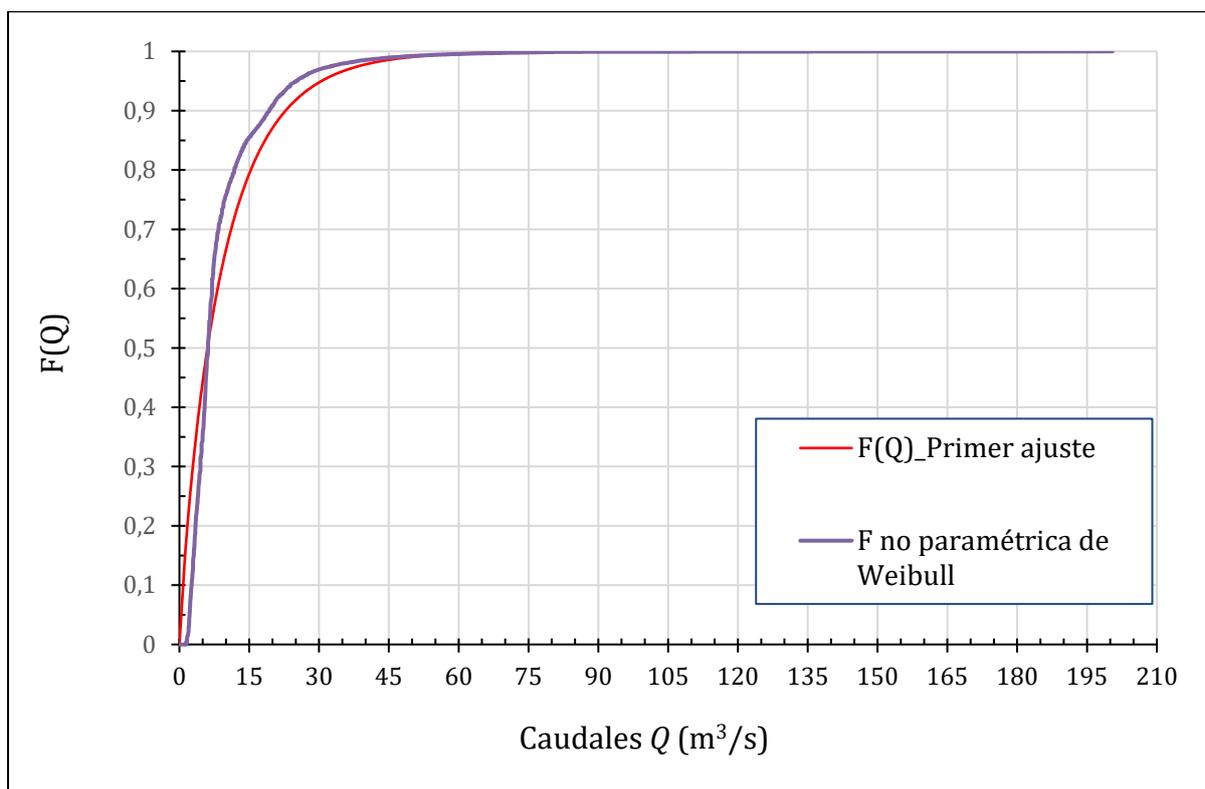


Figura AIV. 1. Comparación de la función acumulada no paramétrica de Weibull y la función de distribución para el primer ajuste.

Para saber con qué hipótesis nos quedamos se debe elegir correctamente de la tabla de distribución Chi Cuadrado. Para ello, es necesario calcular el número de grados de libertad:

$$c = n^{\circ} \text{ de intervalos} - n^{\circ} \text{ de parámetros} - 1 \quad (2)$$

En este caso, tras realizar la frecuencia acumulada de la muestra se ha obtenido que el número de intervalos es 533. Además la función paramétrica de Weibull se determina con dos parámetros:

$$c = 533 - 2 - 1 = 530 \quad (3)$$

Para elegir X_{tabla}^2 se determina que el grado de aceptación es del 95%, es decir, un grado de error del 5%.

$$X_{\text{tabla}}^2 = 584,665 \quad (4)$$

Se ha obtenido: $X_c^2 = 8,312$. Por lo tanto se acepta la hipótesis H_0 .

Bondad del tercer ajuste

Primeramente se obtiene la función de distribución con los parámetros del tercer ajuste:

$$F(Q) = 1 - e^{-\left(\frac{Q}{5,8303}\right)^{0,7213}} \quad (5)$$

La figura 2, representa la curva de la función de distribución acumulada de Weibull para el primer ajuste junto con la curva de distribución acumulada no paramétrica de Weibull.

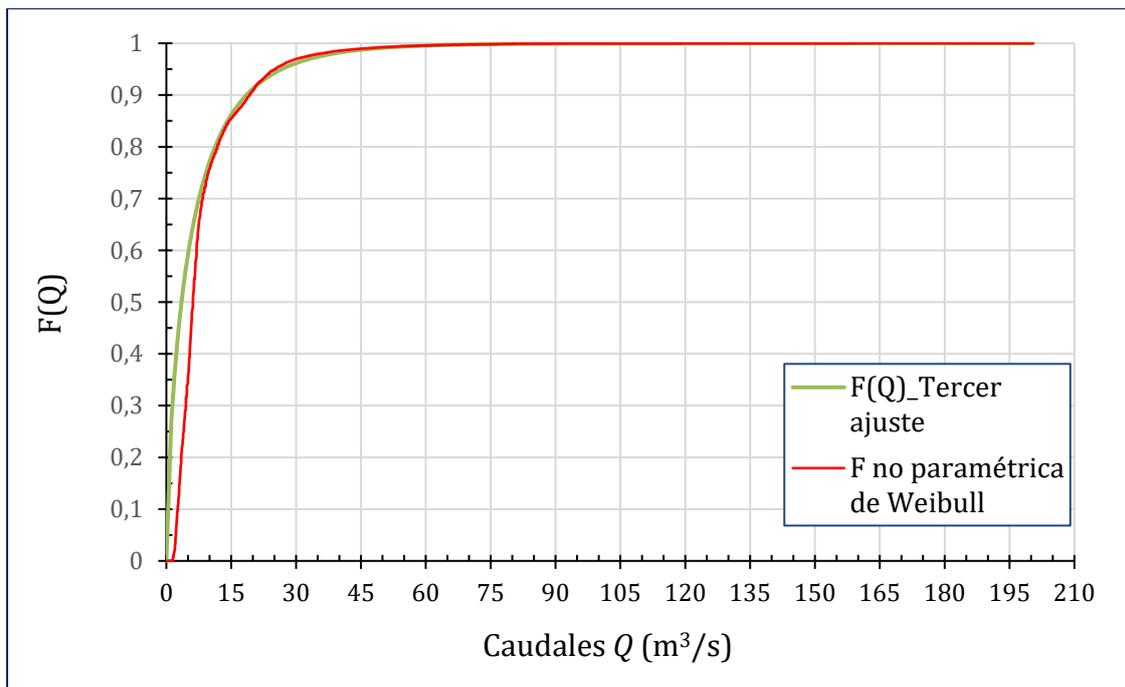


Figura AIV. 2. Comparación de la función acumulada no paramétrica de Weibull y la función de distribución para el tercer ajuste.

Para saber con qué hipótesis nos quedamos se debe elegir correctamente de la tabla de distribución Chi Cuadrado. Para ello, es necesario calcular el número de grados de libertad:

$$c = n^{\circ} \text{ de intervalos} - n^{\circ} \text{ de parámetros} - 1 \quad (6)$$

En este caso, tras realizar la frecuencia acumulada de la muestra se ha obtenido que el número de intervalos es 533. Además la función paramétrica de Weibull se determina con dos parámetros:

$$c = 533 - 2 - 1 = 530 \quad (7)$$

Para elegir X_{tabla}^2 se determina que el grado de aceptación es del 95%, es decir, un grado de error del 5%.

$$X_{\text{tabla}}^2 = 584,665 \quad (8)$$

Se ha obtenido: $X_c^2 = 17,131$. Por lo tanto se acepta la hipótesis H_0 .

ANEXO V: CURVAS DE POTENCIA CON RESPECTO CAUDAL

2006

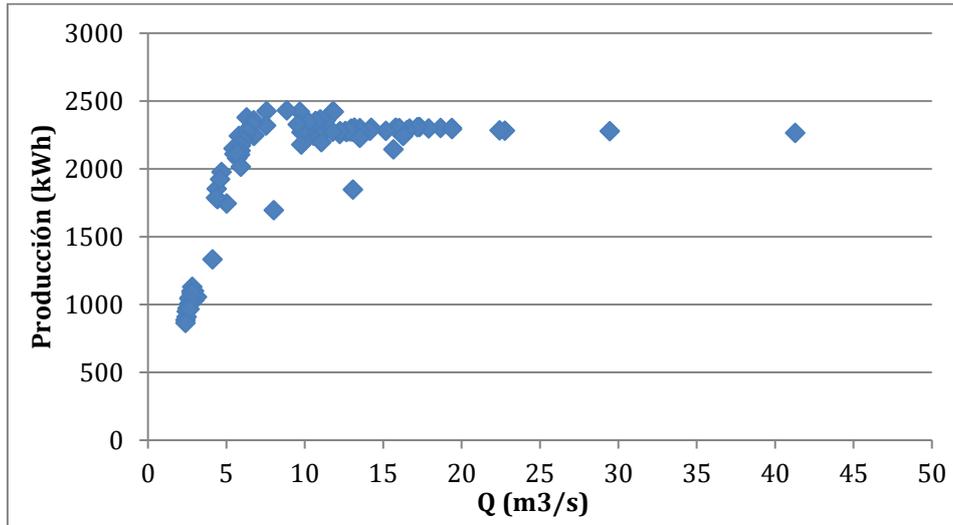


Figura AV. 1. Curva Producción VS Caudal del año 2006

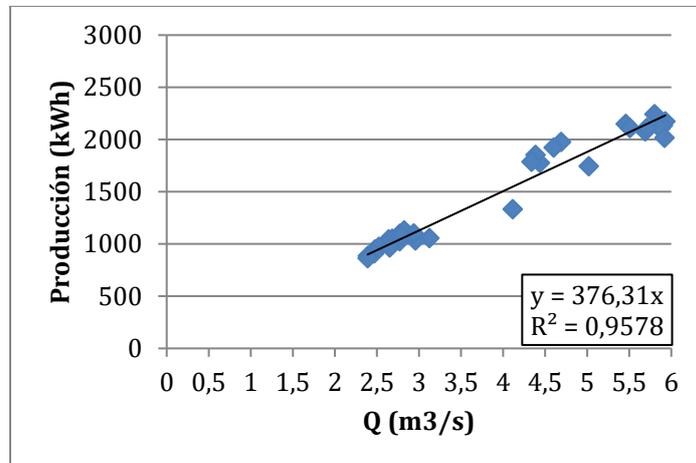


Figura AV. 2. Curva Producción VS Caudal del año 2006 para caudales inferiores a 6 m³/s.

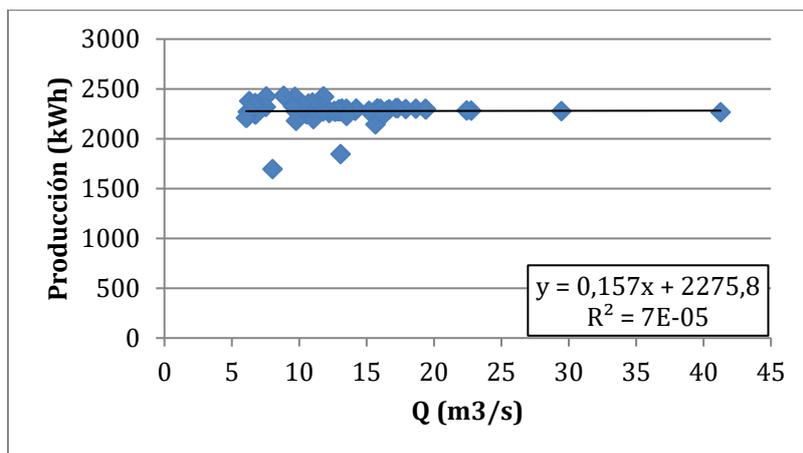


Figura AV. 3. Curva Producción VS Caudal del año 2006 para caudales superiores a 6 m³/s.

2007

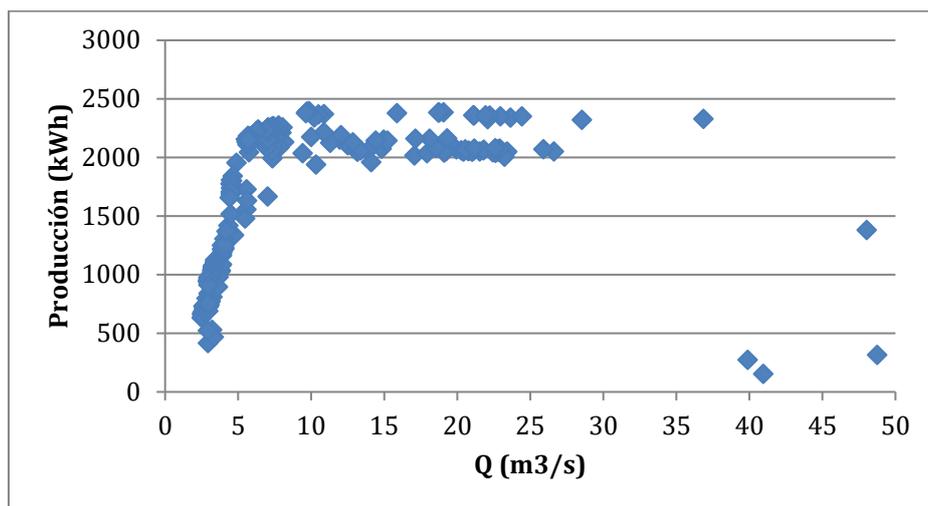


Figura AV. 4. Curva Producción VS Caudal del año 2007.

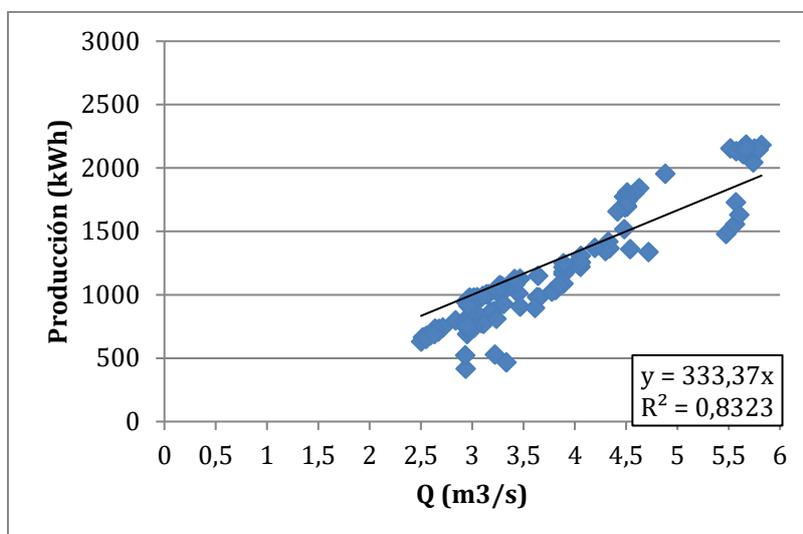


Figura AV. 5. Curva Producción VS Caudal del año 2007 para caudales inferiores a 6 m³/s.

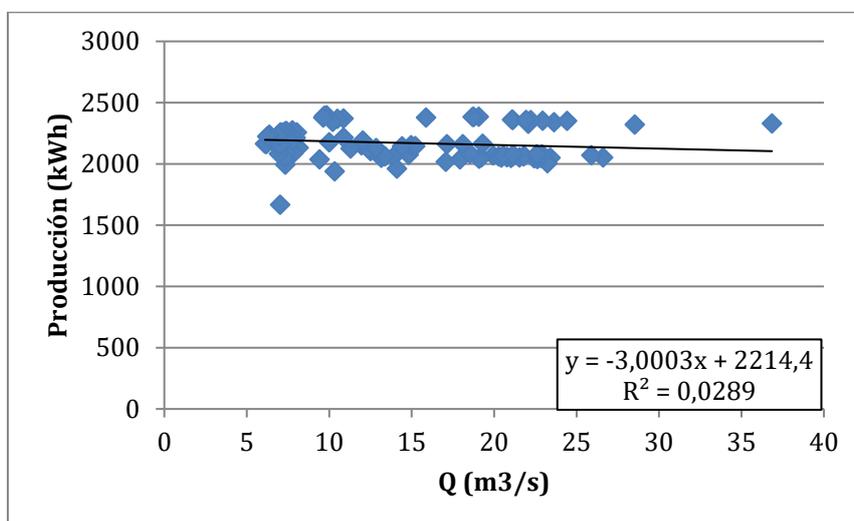


Figura AV. 6. Curva Producción VS Caudal del año 2007 para caudales superiores a 6 m³/s.

2008

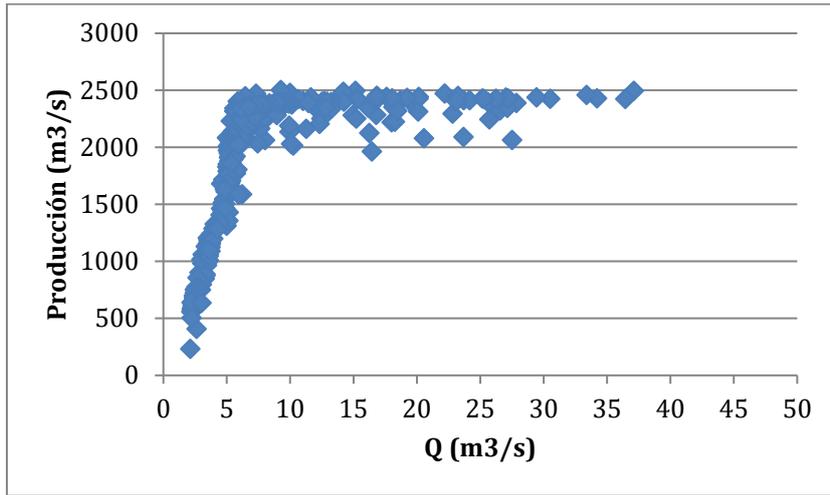


Figura AV. 7. Curva Producción VS Caudal del año 2008

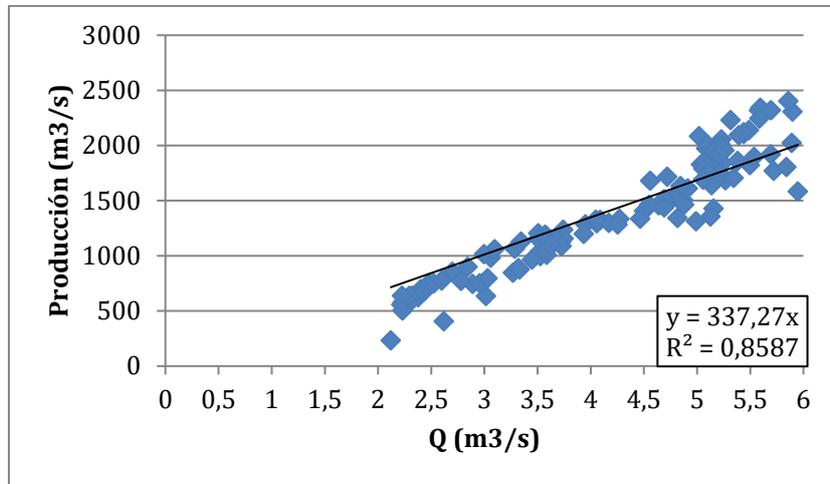


Figura AV. 8. Curva Producción VS Caudal del año 2008 para caudales inferiores a 6 m³/s.

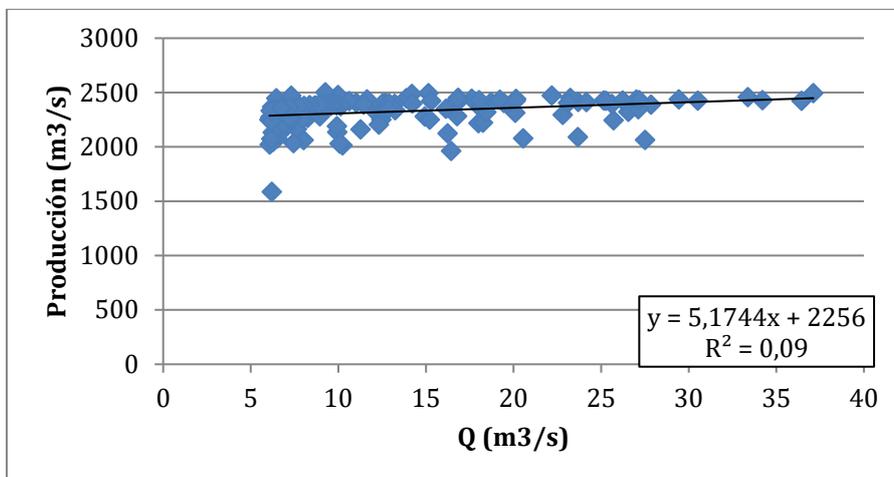


Figura AV. 9. Curva Producción VS Caudal del año 2008 para caudales superiores a 6 m³/s.

2009

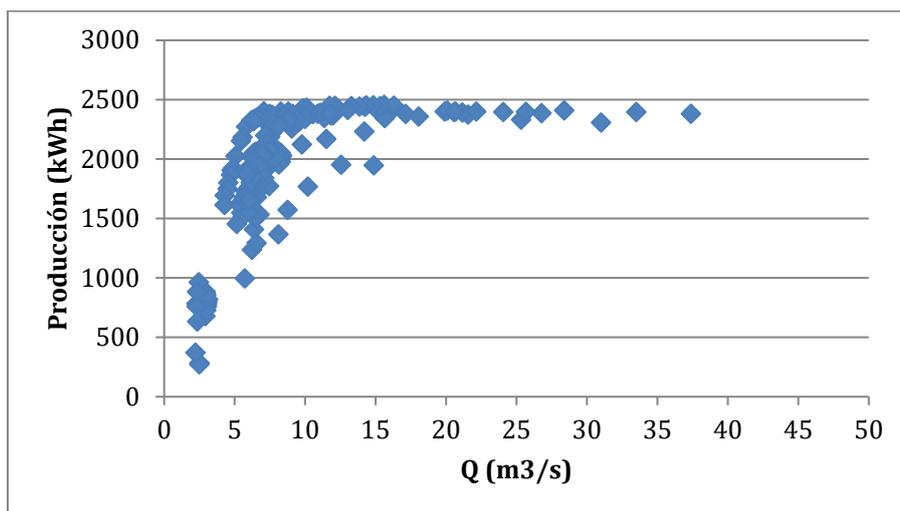


Figura AV. 10. Curva Producción VS Caudal del año 2009

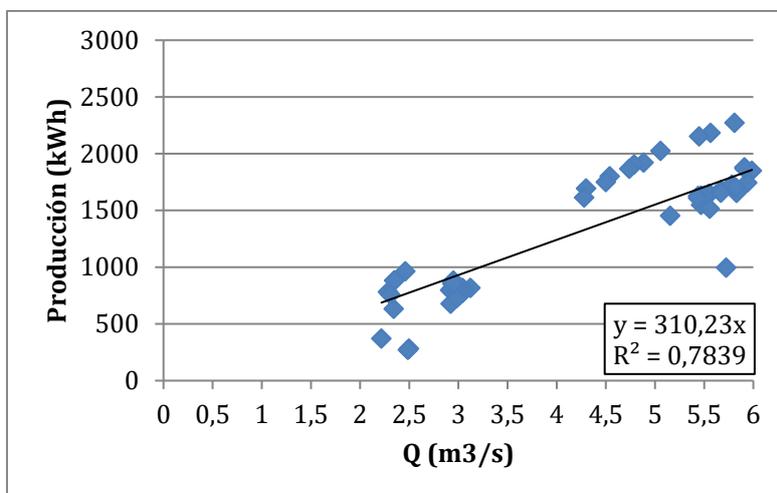


Figura AV. 11. Curva Producción VS Caudal del año 2009 para caudales inferiores a 6 m³/s.

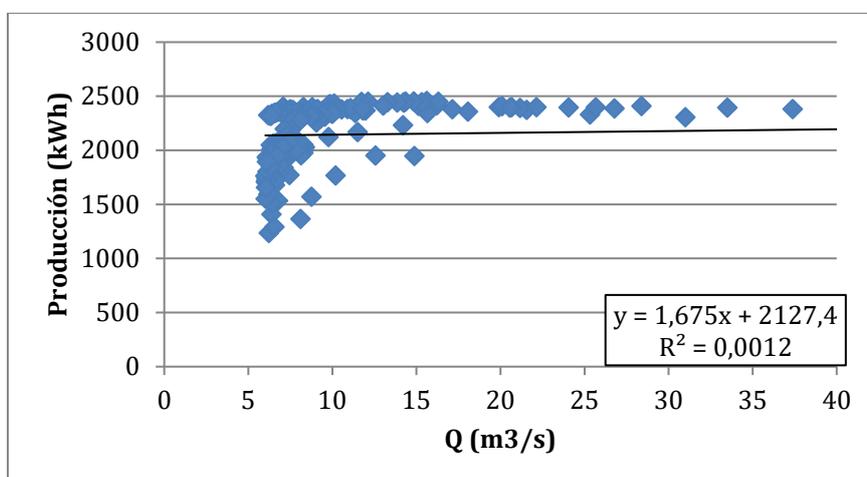


Figura AV. 12. Curva Producción VS Caudal del año 2009 para caudales superiores a 6 m³/s.

2010

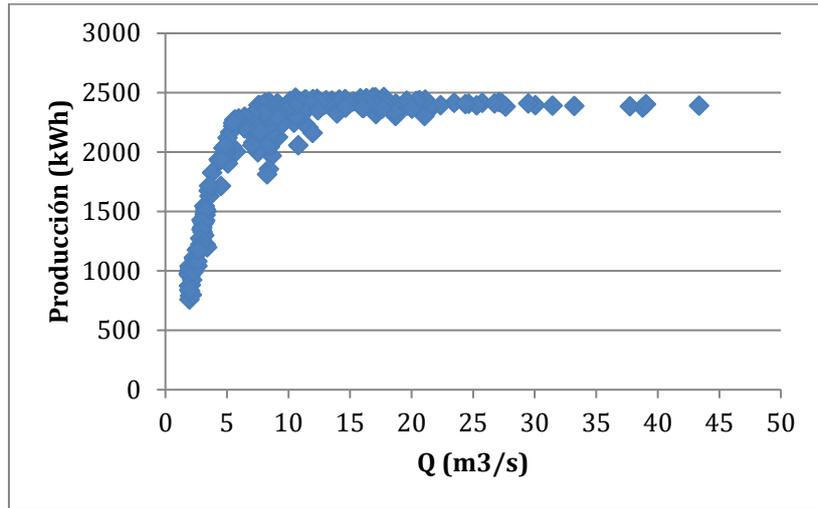


Figura AV. 13. Curva Producción VS Caudal del año 2010

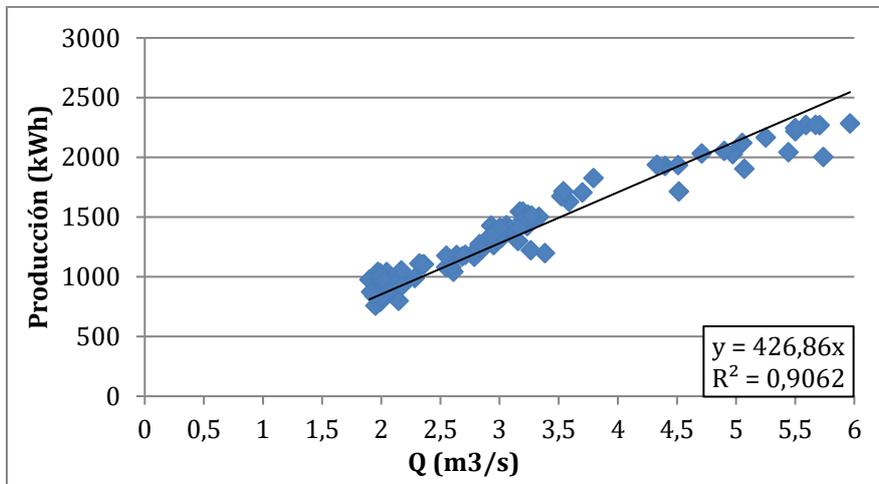


Figura AV. 14. Curva Producción VS Caudal del año 2010 para caudales inferiores a 6 m³/s.

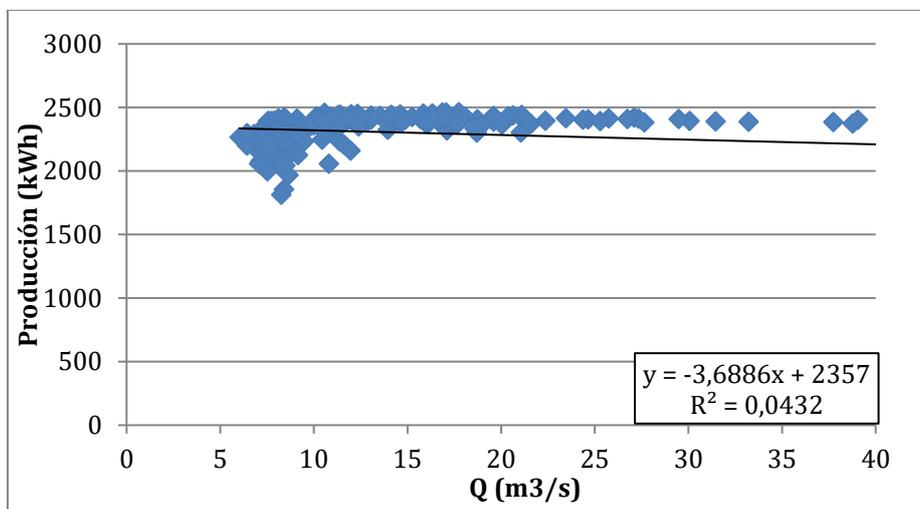


Figura AV. 15. Curva Producción VS Caudal del año 2010 para caudales superiores a 6 m³/s.

2011

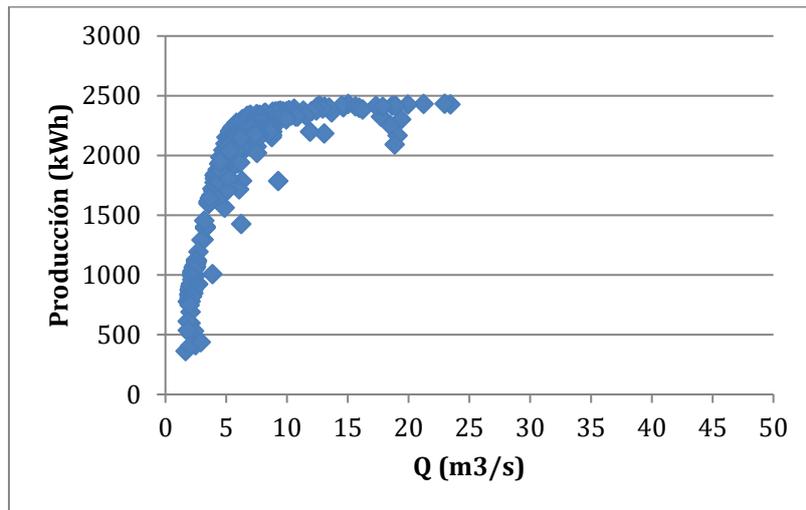


Figura AV. 16. Curva Producción VS Caudal del año 2011

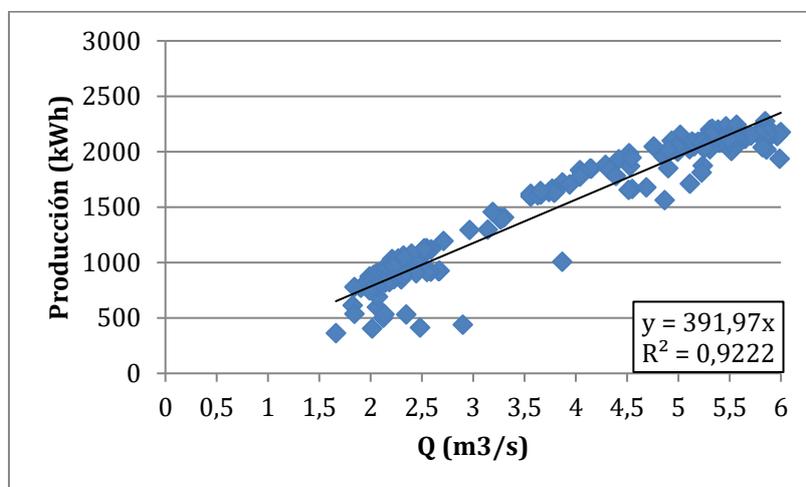


Figura AV. 17. Curva Producción VS Caudal del año 2011 para caudales inferiores a 6 m³/s.

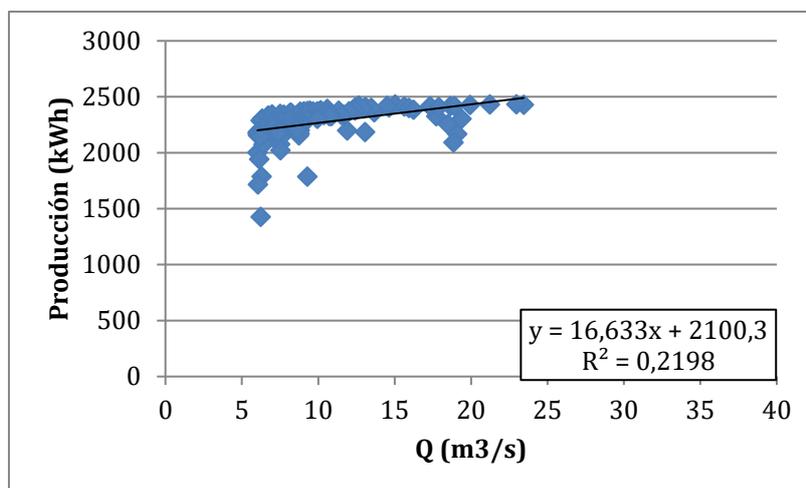


Figura AV. 18. Curva Producción VS Caudal del año 2011 para caudales superiores a 6 m³/s.

2012

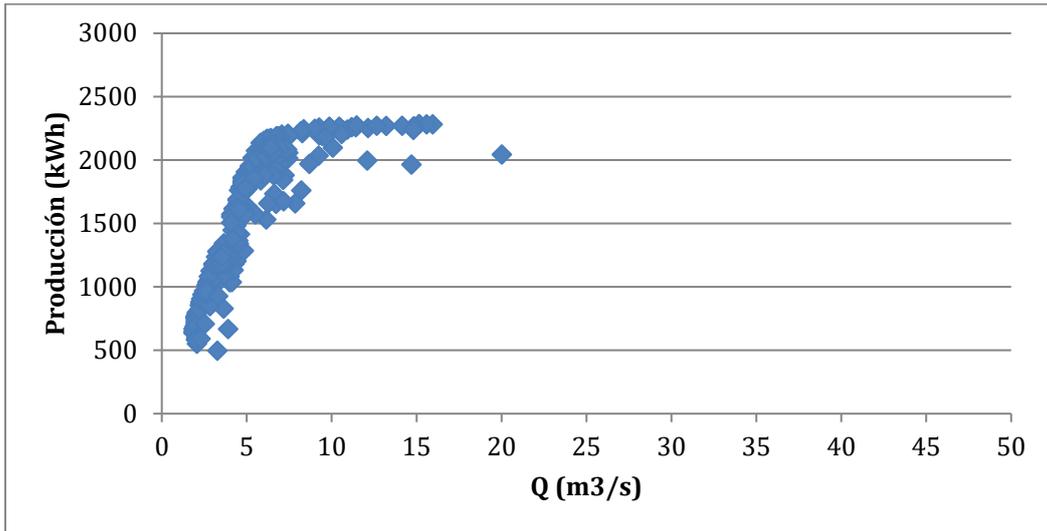


Figura AV. 19. Curva Producción VS Caudal del año 2012

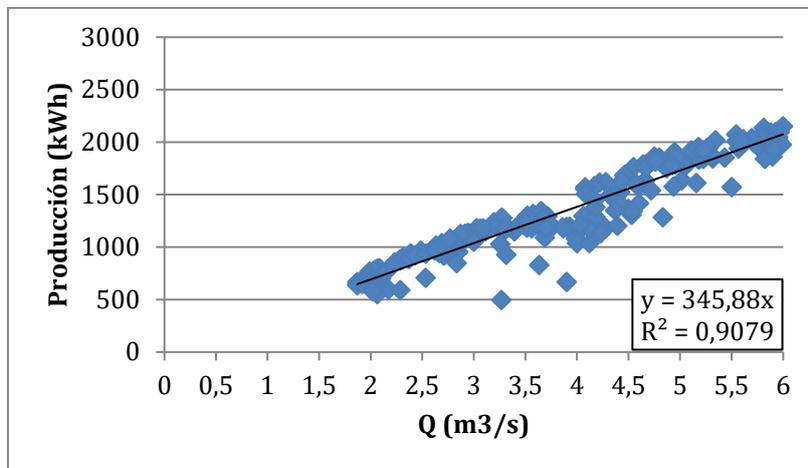


Figura AV. 20. Curva Producción VS Caudal del año 2012 para caudales inferiores a 6 m³/s.

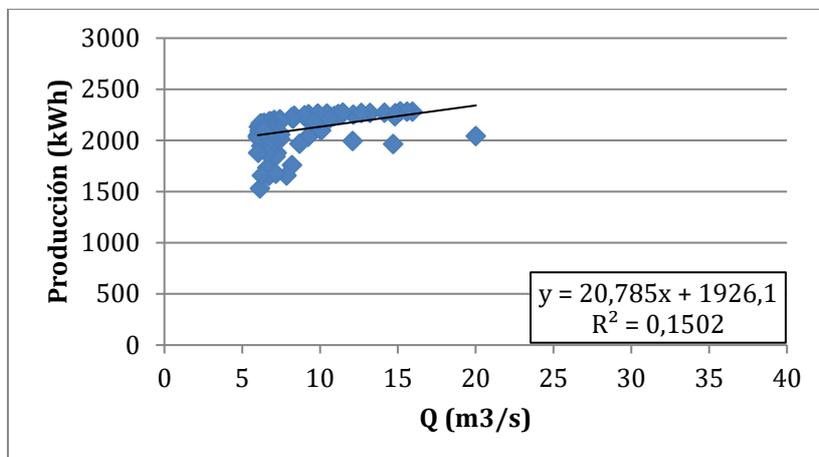


Figura AV. 21. Curva Producción VS Caudal del año 2012 para caudales superiores a 6 m³/s.

2013

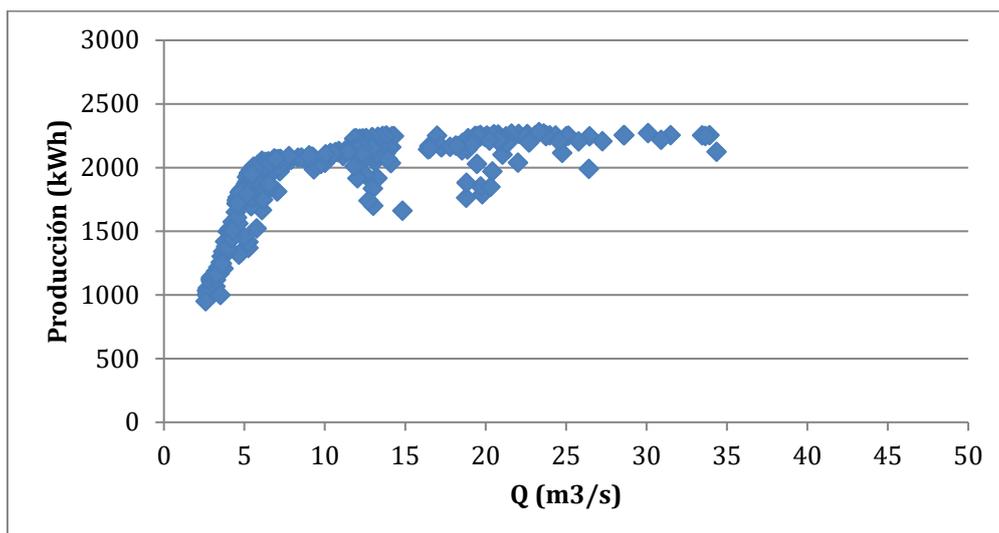


Figura AV. 22. Curva Producción VS Caudal del año 2013

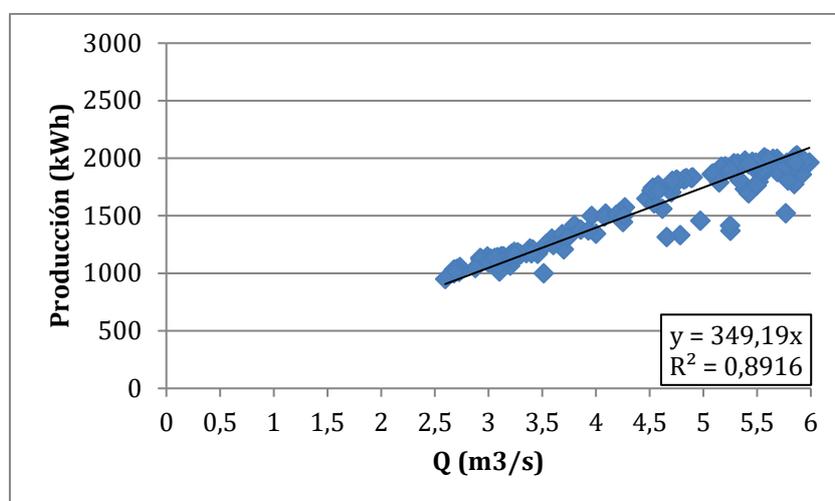


Figura AV. 23. Curva Producción VS Caudal del año 2013 para caudales inferiores a 6 m³/s.

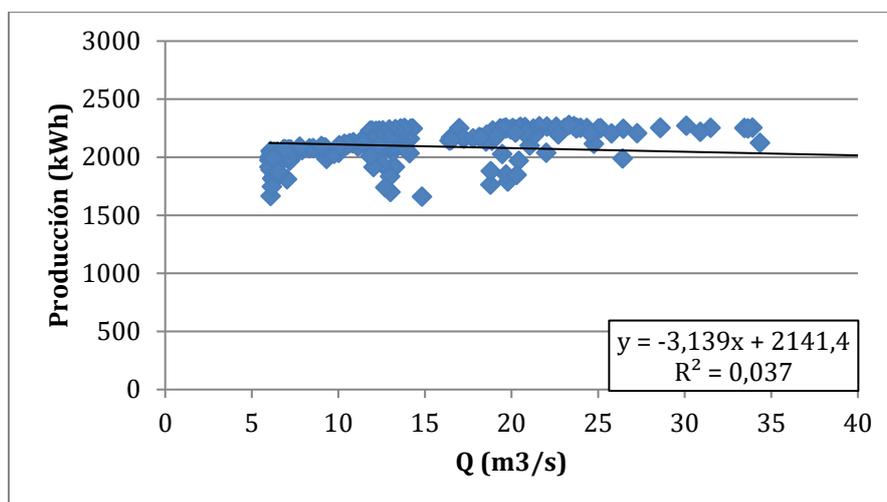


Figura AV. 24. Curva Producción VS Caudal del año 2013 para caudales superiores a 6 m³/s.

2014

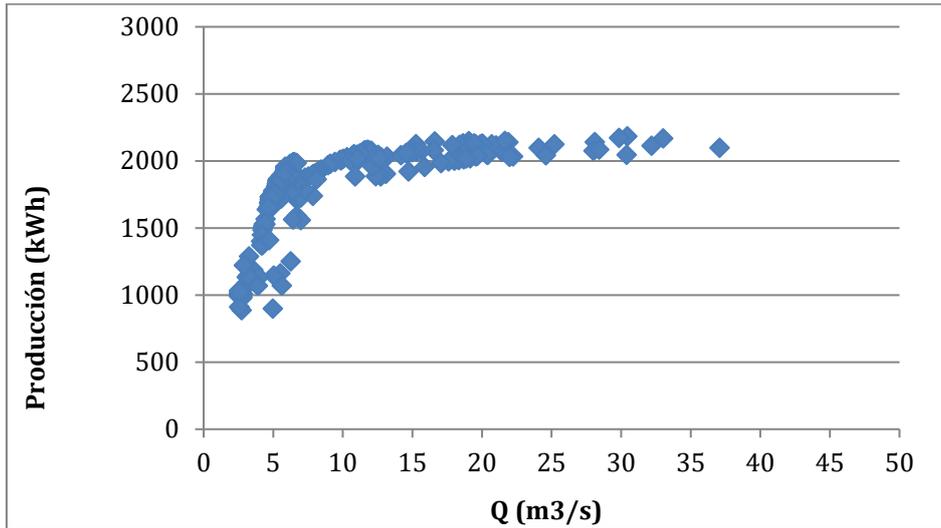


Figura AV. 25. Curva Producción VS Caudal del año 2014

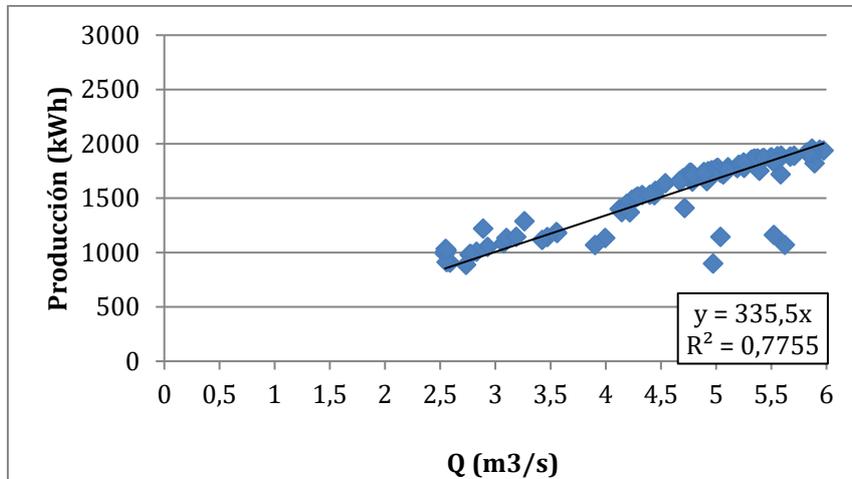


Figura AV. 26. Curva Producción VS Caudal del año 2014 para caudales inferiores a 6 m³/s.

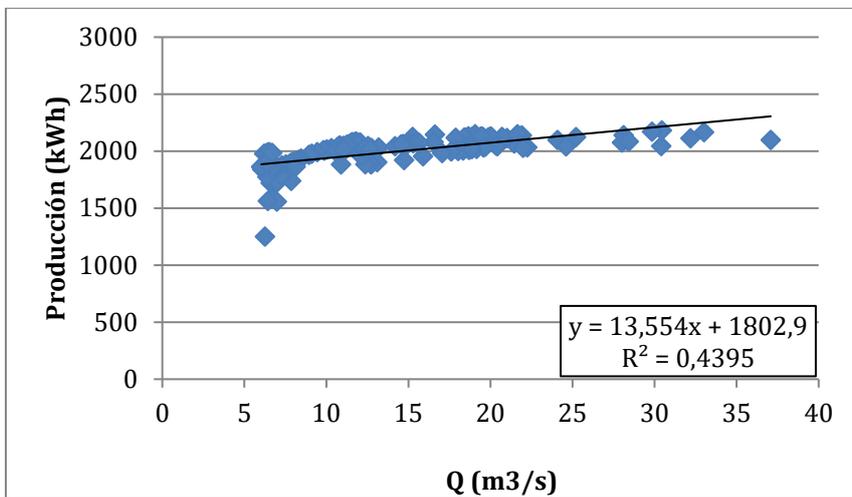


Figura AV. 27. Curva Producción VS Caudal del año 2014 para caudales superiores a 6 m³/s.

2015

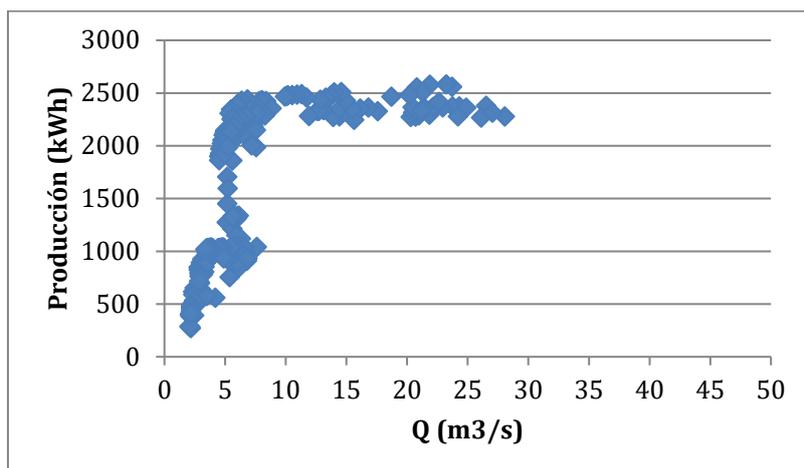


Figura AV. 28. Curva Producción VS Caudal del año 2015

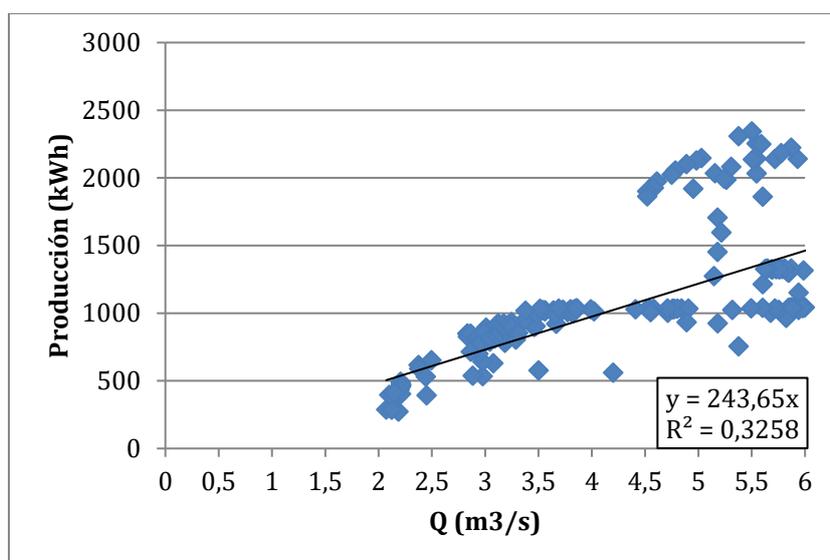


Figura AV. 29. Curva Producción VS Caudal del año 2015 para caudales inferiores a 6 m³/s.

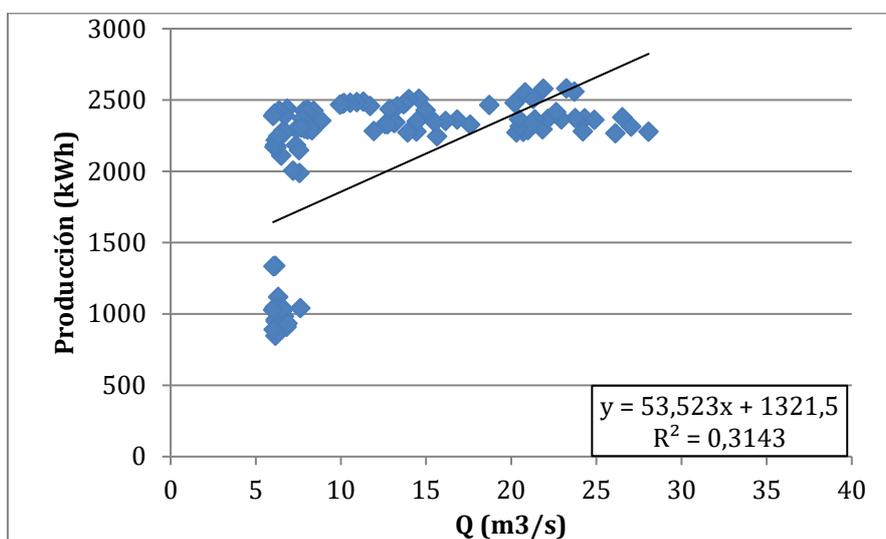


Figura AV. 30. Curva Producción VS Caudal del año 2015 para caudales superiores a 6 m³/s.

2016

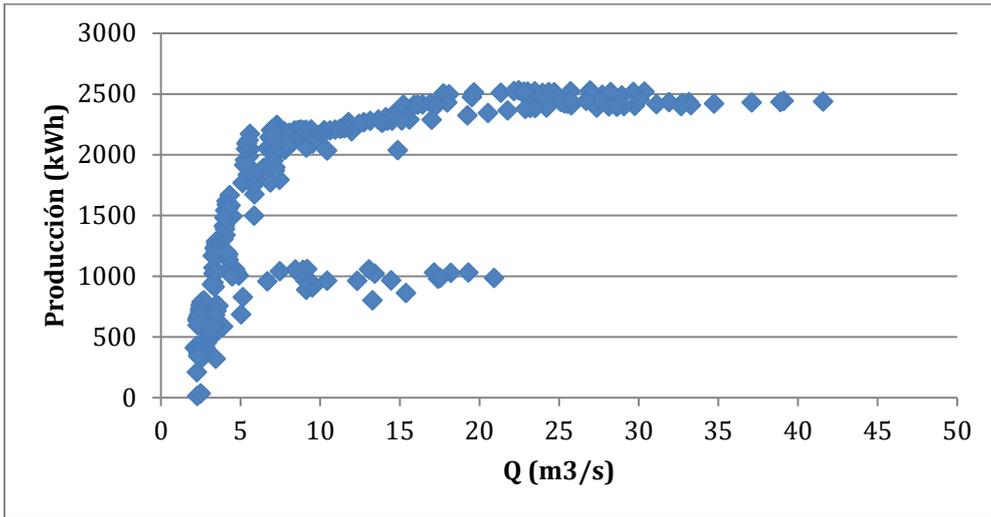


Figura AV. 31. Curva Producción VS Caudal del año 2016

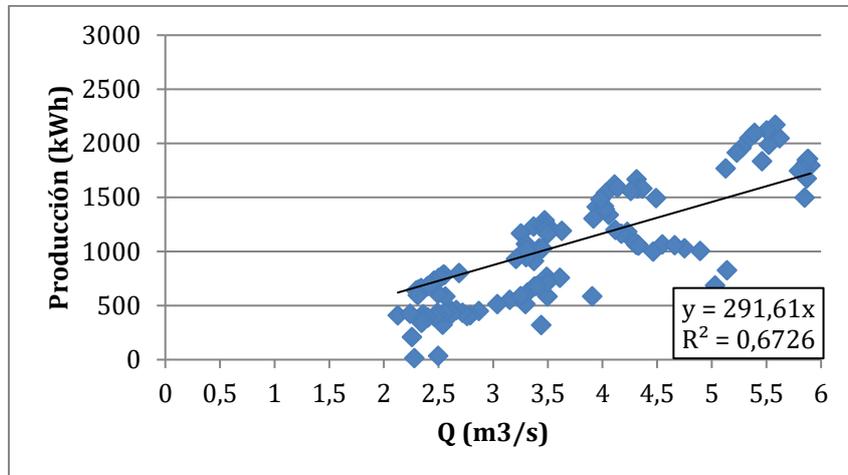


Figura AV. 32. Curva Producción VS Caudal del año 2016 para caudales inferiores a 6 m³/s.

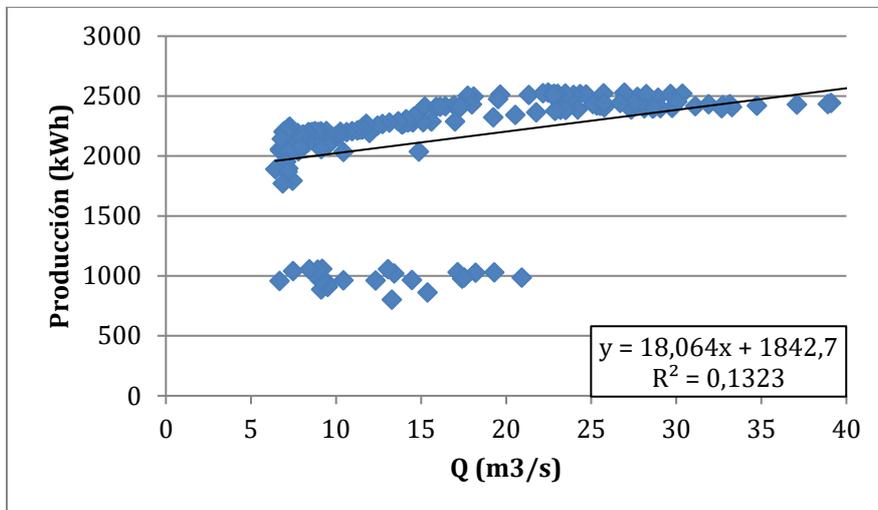


Figura AV. 33. Curva Producción VS Caudal del año 2016 para caudales superiores a 6 m³/s.

2017

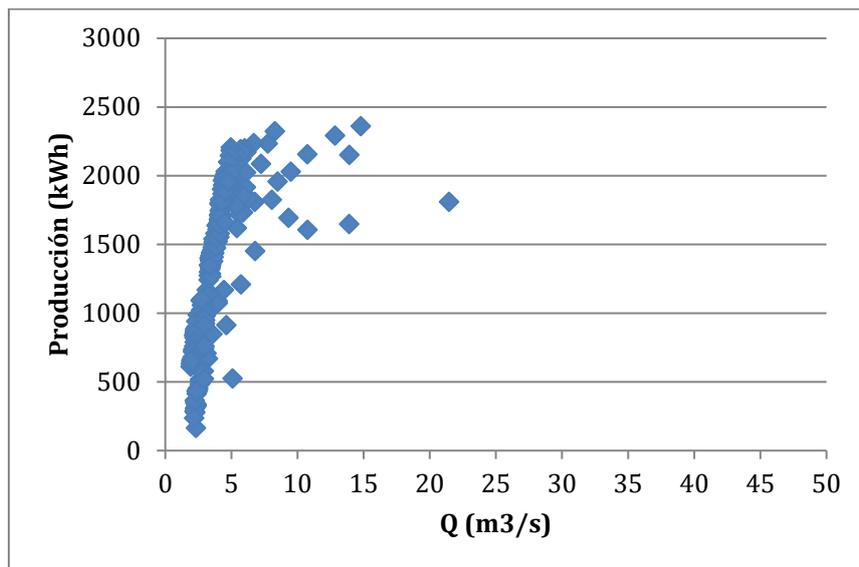


Figura AV. 34. Curva Producción VS Caudal del año 2017

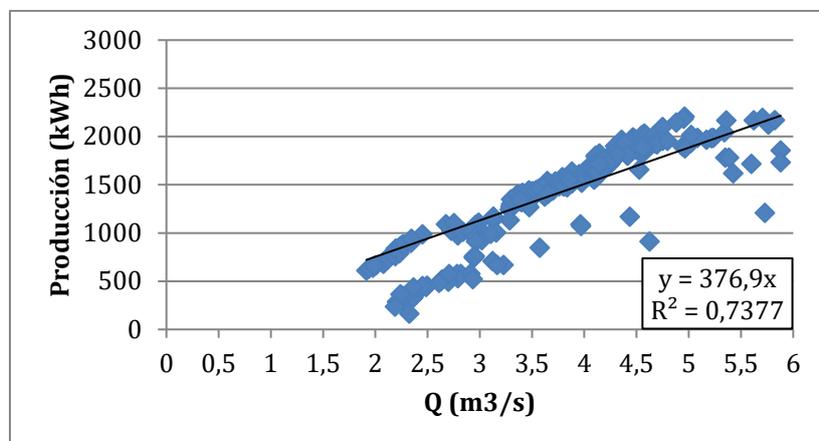


Figura AV. 35. Curva Producción VS Caudal del año 2017 para caudales inferiores a 6 m³/s.

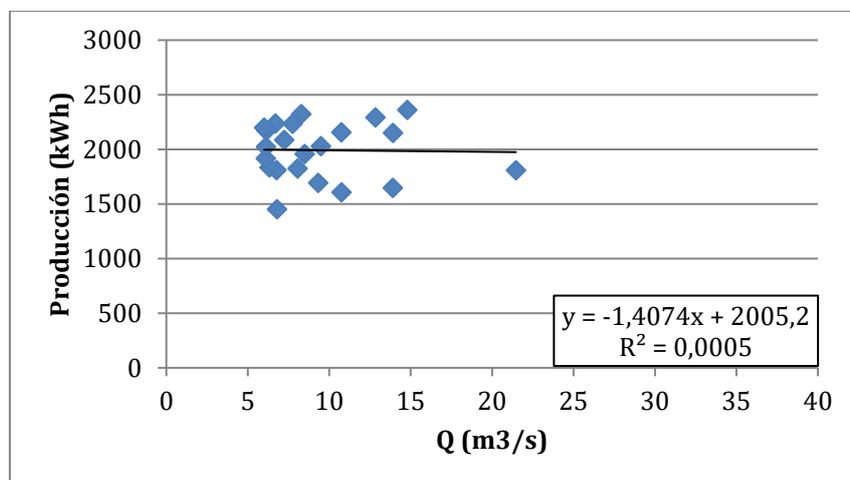


Figura AV. 36. Curva Producción VS Caudal del año 2017 para caudales superiores a 6 m³/s.

2018

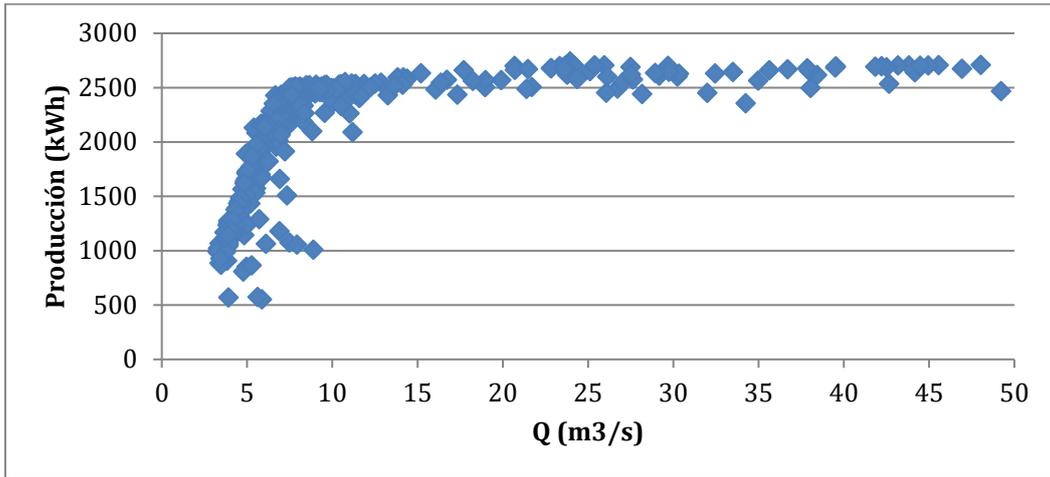


Figura AV. 37. Curva Producción VS Caudal del año 2018

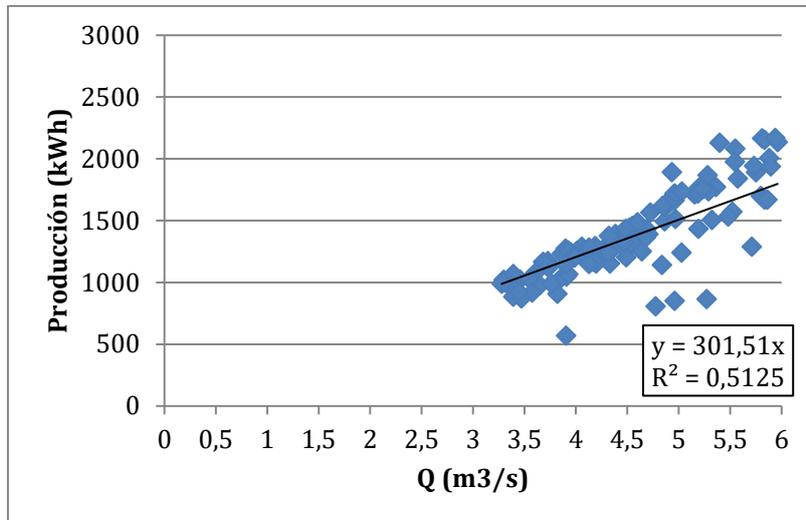


Figura AV. 38. Curva Producción VS Caudal del año 2018 para caudales inferiores a 6 m³/s.

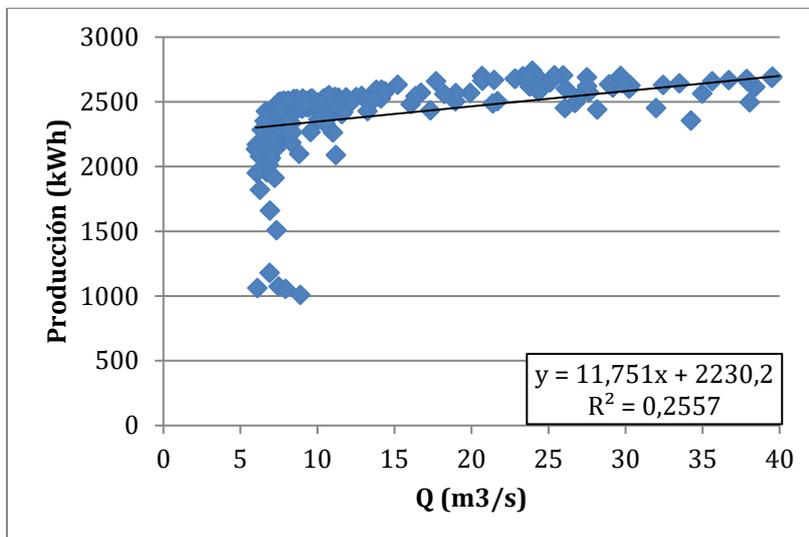


Figura AV. 39. Curva Producción VS Caudal del año 2018 para caudales superiores a 6 m³/s.

ANEXO VI: MODELIZACIÓN CURVAS DE PRODUCCIÓN CON RESPECTO CAUDAL

En la siguiente tabla se recogen las líneas de tendencia junto con el error en el intento de modelización de las curvas de potencia con respecto del caudal.

Se puede observar que la pendiente de crecimiento inicial, en la que va aumentando el caudal es similar en todos los años. Además, también es destacable que la producción, como se había determinado, se encuentra enclavada en torno a 2000kWh una vez se superan los 6 m³/s.

2006			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
2,39-6	$y = 354,93x$ $R^2 = 0,8158$	6-41,28	$y = 0,157x + 2275,8$ $R^2 = 7E-05$
2007			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
2,5-6	$y = 333,37x$ $R^2 = 0,8323$	6-37	$y = -3,0003x + 2214,4$ $R^2 = 0,0289$
2008			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
2,12-6	$y = 337,27x$ $R^2 = 0,8587$	6-37,11	$y = 5,1744x + 2256$ $R^2 = 0,09$
2009			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
2,22-6	$y = 310,23x$ $R^2 = 0,7839$	6-63,58	$y = 1,675x + 2127,4$ $R^2 = 0,0012$
2010			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
1,9-6	$y = 426,86x$ $R^2 = 0,9062$	6-87,4	$y = -3,6886x + 2357$ $R^2 = 0,0432$
2011			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
1,66-6	$y = 391,97x$ $R^2 = 0,9222$	6-23,44	$y = 16,633x + 2100,3$ $R^2 = 0,2198$
2012			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
1,87-6	$y = 345,88x$ $R^2 = 0,9079$	6-20,02	$y = 20,785x + 1926,1$ $R^2 = 0,1502$

2013			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
2,60-6	$y = 349,19x$ $R^2 = 0,8916$	6-79,39	$y = -3,139x + 2141,4$ $R^2 = 0,037$
2014			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
2,54-6	$y = 335,5x$ $R^2 = 0,7755$	6-37,07	$y = 13,554x + 1802,9$ $R^2 = 0,4395$
2017			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
1,91-6	$y = 376,9x$ $R^2 = 0,7377$	6-21,46	$y = -1,4074x + 2005,2$ $R^2 = 0,0005$
2018			
PRIMERA ZONA		SEGUNDA ZONA	
Caudal	Ecuación	Caudal	Ecuación
3,28-6	$y = 301,51x$ $R^2 = 0,5125$	6-61,75	$y = 11,751x + 2230,2$ $R^2 = 0,2557$

Tabla AVI. 1. Modelización de las curvas producción frente a caudal