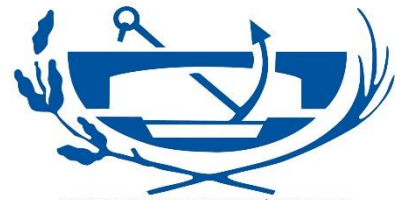




Universidad de Oviedo



COLEGIO DE INGENIEROS TÉCNICOS DE  
OBRAS PÚBLICAS E INGENIEROS CIVILES

*UNIVERSIDAD DE OVIEDO*

*ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES*

*GRADO EN INGENIERÍA CIVIL*

*DEPARTAMENTO DE ENERGÍA  
ÁREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA*

*TRABAJO FIN DE GRADO*

---

# *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA HIDROKINÉTICA SAVONIUS*

*AUTOR: GUILLERMO CEREJIDO LÓPEZ*

*TUTOR: EDUARDO ÁLVAREZ ÁLVAREZ*

*COTUTOR: AITOR FERNÁNDEZ JIMÉNEZ*

*Junio, 2022*



---

# ÍNDICE

1. Resumen.....	7
2. Abstract .....	8
3. Objetivos .....	9
4. Antecedentes .....	10
4.1 Sistema energético mundial. La energía hidráulica .....	10
4.1.1 El sector de la energía.....	10
4.1.2 La energía hidráulica.....	14
4.1.3 Historia.....	16
4.1.4 Siglo XXI .....	19
4.1.5 Futuro .....	22
4.1.6 Ventajas e inconvenientes de la energía hidráulica .....	23
4.2 Turbinas hidráulicas .....	24
4.2.1 Introducción.....	24
4.2.2 Clasificación .....	25
4.2.3 Turbinas hidrocinéticas .....	28
4.2.4 Savonius.....	34
4.3 Impresión aditiva .....	37
4.3.1 Introducción.....	37
4.3.2 Usos .....	37
5. Marco Teórico .....	38
5.1 Fundamentos teóricos .....	38
5.1.1 Flujo en campo abierto y límite de Betz .....	39
5.2 Teoría de Houslby .....	40
5.3 Coeficiente de potencia .....	42

5.4	Tip Speed Ratio (TSR) .....	42
5.5	Fenómeno del bloqueo .....	43
5.5.1	Corrección al fenómeno de bloqueo .....	44
6.	Estudio Experimental .....	45
6.1	Introducción .....	45
6.2	Materiales .....	45
6.2.1	Turbina hidrocínética .....	46
6.2.2	Túnel hidrodinámico .....	47
6.2.3	Sistema para la captación de datos .....	54
6.3	Metodología .....	57
6.4	Resultados .....	58
6.4.1	Introducción .....	58
6.4.2	Caudal de 0,055 m <sup>3</sup> /s .....	59
6.4.3	Caudal de 0,06 m <sup>3</sup> /s .....	60
6.5	Discusión .....	61
7.	Conclusiones .....	64
8.	Trabajos futuros .....	66
9.	Bibliografía .....	67

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Central térmica de carbón (Arstechnica, 2017)</i>	10
<i>Ilustración 2. Central nuclear (Power Technology, s.f.)</i>	11
<i>Ilustración 3. Turbinas eólicas (Statkraft, s.f.)</i>	12
<i>Ilustración 4. Consumo energético mundial por fuente de energía (Our World in Data, s.f.)</i>	12
<i>Ilustración 5. Mix energético español (Statista, s.f.)</i>	13
<i>Ilustración 6. Central hidroeléctrica de las tres gargantas, China (Wall Street Journal, s.f.)</i>	14
<i>Ilustración 7. Central hidroeléctrica de aldeadávila (Público, 2017)</i>	15
<i>Ilustración 8. Generación de energía renovable en el mundo por fuente (Our World in Data, 2020)</i>	15
<i>Ilustración 9. Molino de agua (Pixabay, s.f.)</i>	16
<i>Ilustración 10. Turbina Fourneyron (French River Land, s.f.)</i>	17
<i>Ilustración 11. Diferentes tipos de turbina (OpenLearn, s.f.)</i>	18
<i>Ilustración 12. Crecimiento de la potencia instalada en centrales hidroeléctricas en el siglo XX (IHA, s.f.)</i>	18
<i>Ilustración 13. Generación de energía hidroeléctrica en 2020 en el mundo (Our World in Data, 2021)</i>	19
<i>Ilustración 14. Central hidroeléctrica de Wudongde (General Electric, 2020)</i>	20
<i>Ilustración 15. Mix energético español en 2020 (Red Eléctrica de España, 2022)</i>	21
<i>Ilustración 16. Presa de las Tres Gargantas en el curso del río Yangtsé, en China. La central hidroeléctrica mas grande del mundo (Britannica, 2022)</i>	22
<i>Ilustración 17. Instalación de una turbina Francis (WikiWand, s.f.)</i>	24
<i>Ilustración 18. Turbinas más apropiadas a tenor del caudal y del salto de agua</i>	24
<i>Ilustración 19. Turbina Pelton de fluzo cruzado</i>	25
<i>Ilustración 20. Turbina Francis de flujo radial</i>	25
<i>Ilustración 21. Turbina Kaplan de flujo axial</i>	26
<i>Ilustración 22. Turbina Pelton por arrastre</i>	26
<i>Ilustración 23. Turbina Kaplan por sustentación</i>	27

<i>Ilustración 24. Turbina hidrocínética de flujo axial (Linquip, 2021)</i>	28
<i>Ilustración 25. Turbina hidrocínética (Free Flow Power Corporation, s.f.)</i>	28
<i>Ilustración 26. RivGen</i>	31
<i>Ilustración 27. TidGen</i>	32
<i>Ilustración 28. OcGen</i>	32
<i>Ilustración 29. Nereus</i>	33
<i>Ilustración 30. Solon</i>	33
<i>Ilustración 31. Turbinas eólicas Savonius en Finlandia (Windside, s.f.)</i>	34
<i>Ilustración 32. Parque eólico de turbinas Savonius en la azotea del Oklahoma Medical Research Foundation (New Atlas, s.f.)</i>	35
<i>Ilustración 33. Impresión 3D (eit RawMaterials, 2021)</i>	37
<i>Ilustración 34. Teoría de Betz del disco actuador en campo abierto (Houlsby, Draper, &amp; Oldfield, 2008)</i>	39
<i>Ilustración 35. Teoría de Houlsby del disco actuador en canales (Houlsby, Draper, &amp; Oldfield, 2008)</i>	41
<i>Ilustración 36. Relación coeficiente de potencia – TSR (Restrepo, 2020)</i>	43
<i>Ilustración 37. Métodos de corrección de bloqueo</i>	44
<i>Ilustración 38. Equipo experimental</i>	45
<i>Ilustración 39. Turbina savonius del estudio</i>	46
<i>Ilustración 40. Tunel hidrodinámico</i>	47
<i>Ilustración 41. Tanque de aspiración</i>	48
<i>Ilustración 42. Equipo de bombeo</i>	49
<i>Ilustración 43. Varadores de potencia</i>	50
<i>Ilustración 44. Tanque de tranquilización</i>	51
<i>Ilustración 45. Canal de ensayos</i>	52
<i>Ilustración 46. Compuerta de control</i>	53
<i>Ilustración 47. Sistema para la colocación de la turbina</i>	53
<i>Ilustración 48. Medidor de par y freno</i>	54
<i>Ilustración 49. Fuentes de alimentación</i>	55
<i>Ilustración 50. Software TORQUE 10</i>	56
<i>Ilustración 51. Turbina rota</i>	58

---

# 1. RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo la caracterización de la etapa de potencia de una turbina hidrocínética de eje vertical tipo Savonius en condiciones de baja velocidad de corriente. Para ello se ha utilizado un túnel hidrodinámico situado en el laboratorio del Área de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres.

En primer lugar, se ha hecho un estudio de la situación energética mundial con especial énfasis en el mercado eléctrico español y en la posición que las energías renovables ocupan en él. A continuación, se ha introducido y analizado a fondo la energía hidroeléctrica y las turbinas hidráulicas y, más en concreto, las hidrocínéticas. En relación con estas últimas, se procedió a describir en detalle los conceptos fundamentales necesarios para la correcta caracterización de la turbina a estudiar.

Mediante la utilización de un sistema de captación de datos basado en medición de par y freno eléctrico, se ha realizado la caracterización de la turbina Savonius obteniendo datos de par mecánico, velocidad de rotación y potencia mecánica. Cabe destacar que la turbina ha sido sometida a dos caudales diferentes para estudiar su funcionamiento ante diferentes condiciones.

Para finalizar, se ha procedido al tratamiento de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, corrigiendo la afección del fenómeno de bloqueo sobre los mismos. Finalmente se ha corroborado el correcto funcionamiento del rotor diseñado y se han obtenido sus curvas de potencia.

---

## 2. *ABSTRACT*

In this End of Degree Project, the experimental testing and the characterization of the power stage of a Savonius-type vertical axis hydrokinetic turbine in low current speed conditions has been conducted. A hydrodynamic tunnel located in the Hydraulic Engineering Department's laboratory at the Polytechnic School of Mieres was used for that purpose.

First, a study of the world's energetic situation has been made, with special emphasis on the Spanish market and the position that renewable energies have in it. Next, the hydroelectric energy and turbines and, more specifically, the hydrokinetic turbines have been introduced and thoroughly analysed. Related to the latter, the fundamental concepts necessary for the correct characterization of the turbine to be studied were described in detail.

Using a data collection system based on torque measuring and electric brake, the characterization of the Savonius turbine has been done, obtaining data on mechanical torque, rotational speed and mechanical power. It should be noted that the turbine has been subject to two different flow rates to study its operation under different conditions.

Finally, the results obtained from the experimental tests have been treated, correcting the blockage effect affecting them. Ultimately, the correct operation of the designed rotor has been verified and its power curves have been obtained.



### 3. *OBJETIVOS*

El presente Trabajo Fin de Grado (*TFG*) tiene como objetivo principal la caracterización del diseño de una turbina hidrocínética de eje vertical tipo Savonius bajo condiciones de baja velocidad de corriente de agua. Para ello, se llevarán a cabo diferentes pruebas experimentales en el túnel hidrodinámico de la Escuela Politécnica de Mieres. Adicionalmente, se tendrán en cuenta los siguientes objetivos específicos:

- Diseño y fabricación mediante tecnología de impresión aditiva de un rotor de eje vertical tipo Savonius. Este diseño será posteriormente caracterizado en túnel hidrodinámico.
- Análisis de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales y estudio del comportamiento de la turbina hidrocínética durante su fase de potencia.

## 4. ANTECEDENTES

### 4.1 SISTEMA ENERGÉTICO MUNDIAL. LA ENERGÍA

#### HIDRÁULICA

##### 4.1.1 EL SECTOR DE LA ENERGÍA

###### a. HISTORIA

Antes de la Revolución Industrial, nuestras necesidades energéticas eran modestas. Para calentarnos hacíamos uso del Sol o, en su ausencia, de la quema de leña u otros materiales. Para movernos: los caballos por tierra y la fuerza del viento por mar, nos permitía llegar a cualquier parte del mundo. El agua y el viento hacían funcionar la sencilla maquinaria que molían nuestro grano o bombeaban nuestra agua.



(Union of Concerned Scientists, 2006)

ILUSTRACIÓN 1. CENTRAL TÉRMICA DE CARBÓN (ARSTECHNICA, 2017)

A finales del siglo XIX aparecía otro tipo de energía: la electricidad. Así, las centrales térmicas de carbón comenzaron a aparecer en Europa y Estados Unidos en la década de 1880, primero como fuentes de iluminación y más tarde como fuente de energía para tranvías y trenes. La industria siguió la tendencia en la primera mitad del siglo XX. Gracias a la implantación de la electricidad, el uso de la energía estaba al alcance de tocar un interruptor de modo que las condiciones de trabajo mejoraron mucho y las fábricas se volvieron más limpias y seguras, además de mucho más productivas.

Durante esta época parecía que el petróleo solo tendría un papel menor en la generación de energía. Esto cambió rápidamente con la invención del motor de combustión interna y el surgimiento del automóvil asequible producido en masa. Así, la

demanda de petróleo se disparó y, a medida que la industria petrolera se expandió, se encontraron nuevos usos para el petróleo como la generación de electricidad.

No es esta mediados del siglo XX cuando comienza una creciente preocupación sobre cuánto tiempo podrían durar las reservas de los combustibles fósiles. La crisis del precio del petróleo de 1973, que vio su precio quintuplicado, incitó a muchos países a buscar fuentes de energía alternativas y a desarrollar tecnologías más eficientes.



ILUSTRACIÓN 2. CENTRAL NUCLEAR (POWER TECHNOLOGY, S.F.)

Dependiendo del país se tendió hacia unas u otras fuentes energía. Por ejemplo, el Reino Unido viró hacia el gas natural mientras que España o Noruega lo hizo hacia la energía hidroeléctrica. Otros, como Francia y EE. UU. apostaron por la nuclear. (Nature, 2017).

Hoy en día muchos países del mundo ya generan más del 20% de su energía a partir de fuentes renovables, algunos incluso llegando a generar más de la mitad de su mix energético a partir de energías limpias.

**b. ENERGÍAS RENOVABLES**

En 2021 el mundo añadió 295 GW de capacidad de generación de energías renovables, un récord, que en 2022 se espera que aumente aún más, llegando hasta los 320 GW. A la cabeza del crecimiento está la energía solar, con un 60% del crecimiento mundial de energía renovable en 2022, seguida por la eólica y la hidroeléctrica. (IEA, 2022)



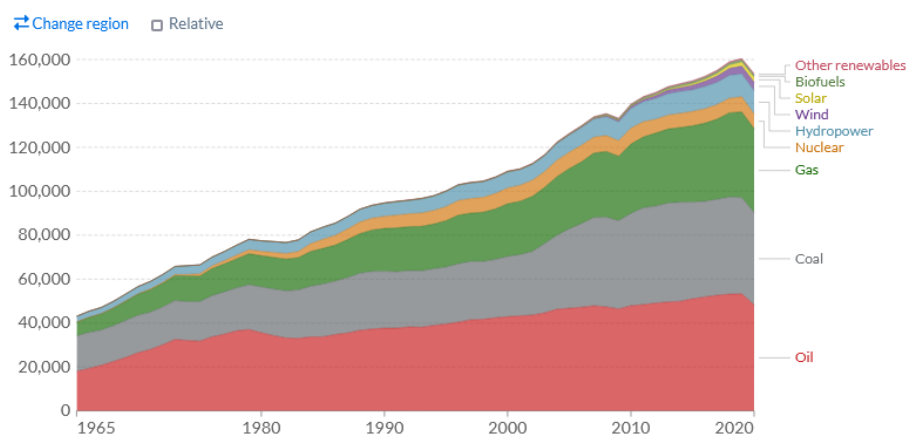
ILUSTRACIÓN 3. TURBINAS EÓLICAS (STATKRAFT, S.F.)

En lo que va de año el crecimiento de las energías renovables está siendo mucho más rápido de lo esperado. Esto es debido, principalmente, al fuerte apoyo político por parte de China, la Unión Europea y América Latina, que compensan el crecimiento más lento de lo esperado de EE. UU.

A pesar de esto, se espera que para 2023 el crecimiento de las energías renovables se estabilice, debido principalmente a una caída del 40% en la expansión de la hidroeléctrica que no parece que vaya a ser compensada con una mayor inversión en eólica y solar.

**Energy consumption by source, World**

Primary energy consumption is measured in terawatt-hours (TWh). Here an inefficiency factor (the 'substitution' method) has been applied for fossil fuels, meaning the shares by each energy source give a better approximation of final energy consumption.



Source: BP Statistical Review of World Energy  
 Note: 'Other renewables' includes geothermal, biomass and waste energy.

OurWorldInData.org/energy • CC BY

ILUSTRACIÓN 4. CONSUMO ENERGÉTICO MUNDIAL POR FUENTE DE ENERGÍA (OUR WORLD IN DATA, S.F.)

### C. EL SECTOR ENERGÉTICO ESPAÑOL

El sistema energético en nuestro país se caracteriza por una gran diversidad en los sistemas de producción eléctrica. El llamado mix energético que se puede ver en el gráfico siguiente, presenta una gran diversificación y demuestra la importancia que las distintas fuentes de generación de energía tienen en España.

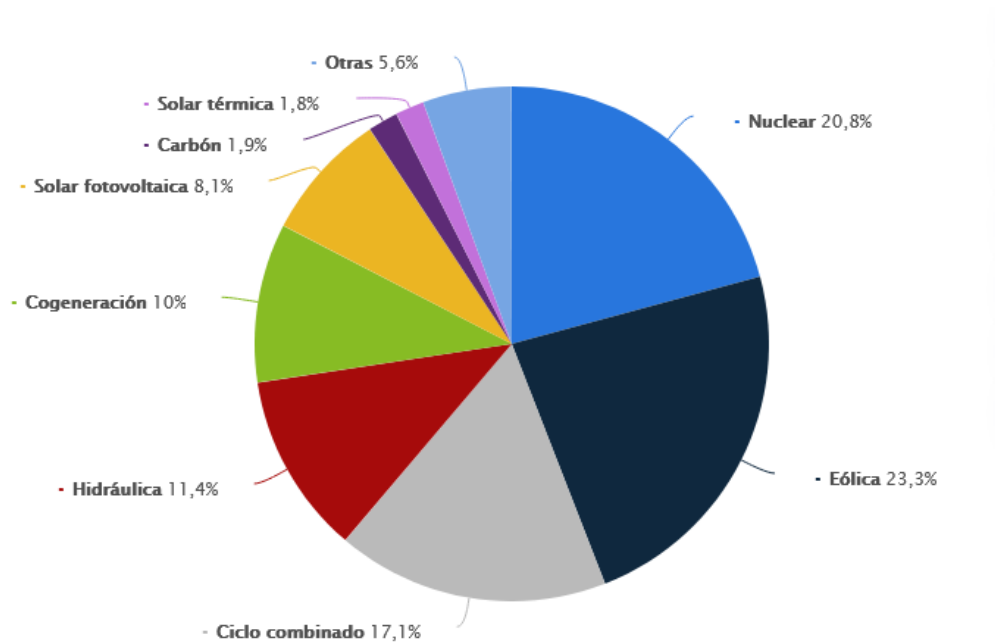


ILUSTRACIÓN 5. MIX ENERGÉTICO ESPAÑOL (STATISTA, S.F.)

En 2021 la generación de energía en España se situó en torno a los 259.000 GWh. La energía nuclear, con el 20,8% de la generación de energía, dejó de ser la principal fuente de energía para dejar paso a la eólica, que representó más del 23% de la producción energética nacional. (Statista, 2021)

En 2021, el peso de las energías renovables en España sigue aumentando hasta suponer el 46,7% de la electricidad, de la que casi la mitad fue generada por la fuerza del viento. En este sentido, destacan como principales regiones generadoras de energía eólica Castilla y León, Galicia y Aragón (Statista, 2021).

### 4.1.2 LA ENERGÍA HIDRÁULICA

Como es bien sabido, la energía ni se crea ni se destruye, sino que únicamente se transforma. Este principio es aplicable a la generación de electricidad ya que un tipo de energía (por ejemplo, mecánica) es transformada en electricidad.



ILUSTRACIÓN 6. CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE LAS TRES GARGANTAS, CHINA (WALL STREET JOURNAL, S.F.)

Para la generación de energía hidráulica, cuando el flujo de agua hace girar las aspas de las turbinas esta energía del fluido (cinética y/o potencial) se convierte en mecánica. La turbina gira el rotor del generador que a su vez convierte esta energía mecánica en otro tipo de energía (electricidad). Como la fuente original de energía es el agua, llamamos a esto energía hidráulica. (U.S. Department of the Interior, 2005)

La energía hidráulica es más barata de producir que la mayoría del resto de fuentes de energía, haciéndolo un recurso renovable económico. Excepto durante los periodos de sequía extrema, podemos contar con un flujo constante de agua tanto por el día como por la noche durante todo el año. Esta estabilidad es crítica si queremos confiar únicamente en fuentes de energía limpias como la solar o la eólica, que solo son aprovechables cuando brilla el Sol o sopla el viento. (National Renewable Energy Laboratory, s.f.)

La energía hidráulica también tiene desventajas. Por un lado, la creación de embalses puede destruir o desestabilizar la fauna u otros recursos naturales. Las centrales hidroeléctricas también pueden producir bajas concentraciones de oxígeno en el agua, lo que es perjudicial para los ecosistemas y, en algunos casos, para la agricultura.

Por otro lado, los costes de instalación y mantenimiento de las centrales hidroeléctricas pueden ser muy altos, ya que la inversión inicial de capital puede ser un gran obstáculo para su construcción. (Just Energy, s.f.)



ILUSTRACIÓN 7. CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE ALDEADÁVILA (PÚBLICO, 2017)

A principios del siglo XXI, la energía hidráulica era la fuente de energía renovable más utilizada en el mundo. De hecho, en 2019 representaba más del 18% de la generación energética mundial. (Britannica, s.f.)

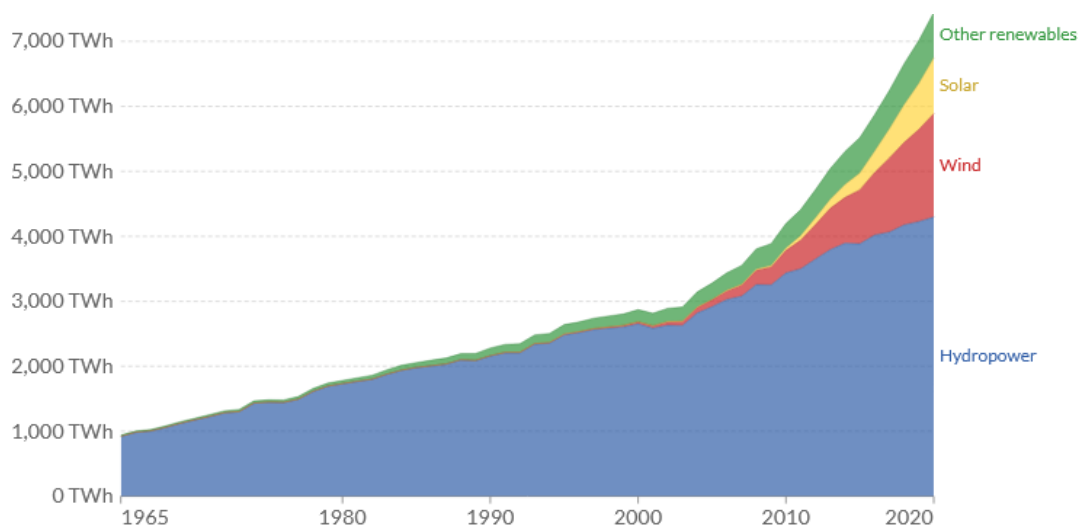


ILUSTRACIÓN 8. GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN EL MUNDO POR FUENTE (OUR WORLD IN DATA, 2020)

Por países, China es el mayor productor mundial mientras que otros grandes productores hidroeléctricos son Estados Unidos, Brasil, Canadá, India y Rusia. Cabe

destacar que, aproximadamente, el 71% de toda la energía renovable generada en la Tierra proviene del agua. (National Geographic, s.f.)

### 4.1.3 HISTORIA

El hombre ha aprovechado el agua para realizar trabajo desde hace miles de años. Uno de los primeros usos del agua como fuente de energía fue concebido en China durante la dinastía Han, entre el 202 AC y el 9 DC. En esta región, se desarrollaron martillos propulsados por una rueda vertical impulsada por agua cuyo objetivo era moler grano, romper mena o como dispositivo fundamental en la fabricación de papel. (IEA, s.f.)

En occidente, los griegos ya usaban molinos de agua para moler trigo en harina hace más de 2000 años mientras que los egipcios usaban tornillos de Arquímedes para la irrigación durante el siglo III a.C. (Office of energy efficiency and renewable energy, s.f.)



ILUSTRACIÓN 9. MOLINO DE AGUA (PIXABAY, S.F.)

En el siglo XVIII comienza la evolución de la turbina hidráulica moderna cuando Bernard Forest de Bélidor, un ingeniero militar e hidráulico francés escribió el *Architecture Hydraulique*. A su vez, Richard Arkwright crea Cromford Mill en el valle de Derwent en Inglaterra. En este dispositivo, la energía del agua en el molino giraba el algodón, creando uno de los primeros usos industriales de la energía hidráulica. De ese punto en adelante, la energía hidráulica se convirtió en una fuente de energía prominente en el



mundo. Durante este periodo sus usos y aplicaciones crecieron a medida que se creó y mejoró las formas de aprovechamiento de los flujos de agua.

No es hasta el siglo XIX cuando comienzan los avances más importantes en el desarrollo de la turbina hidráulica. En 1827, el ingeniero francés Benoit Fourneyron diseña una turbina hidráulica capaz de generar 6 caballos de potencia.

Posteriormente, el ingeniero angloamericano James Francis crea la primera turbina hidráulica que aún usamos hoy en día. Cabe destacar que este diseño de rotor sigue siendo uno de los más utilizados en la actualidad.

Durante la década de 1870, el estadounidense Lester Allan Pelton patenta la turbina Pelton por arrastre,

mejorando la eficiencia en la producción energética con su innovador uso de las palas en forma de cuchara.

Ya en el siglo XX, Viktor Kaplan crea la turbina Kaplan en 1913. Este profesor austriaco inventó una turbina de flujo axial con un rodete que funciona de manera semejante a la hélice del motor de un barco. (trvst, 2022)

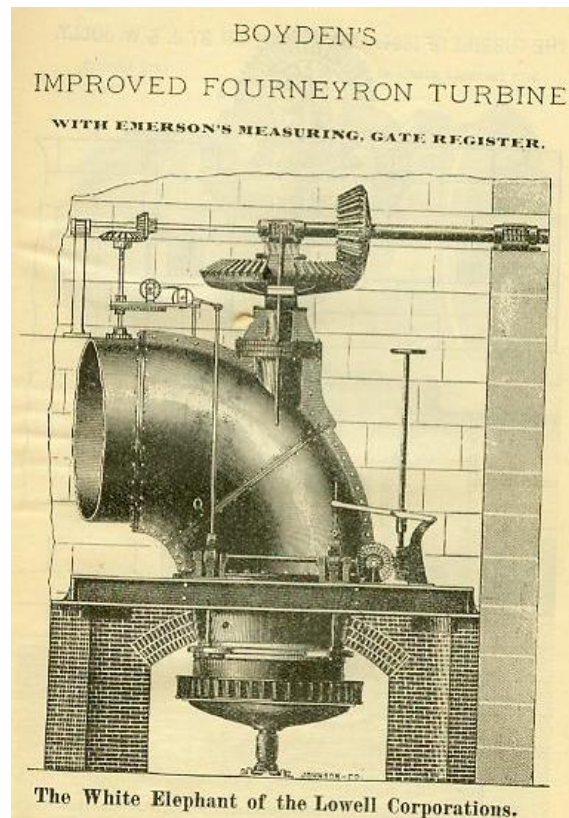


ILUSTRACIÓN 10. TURBINA FOURNEYRON (FRENCH RIVER LAND, S.F.)

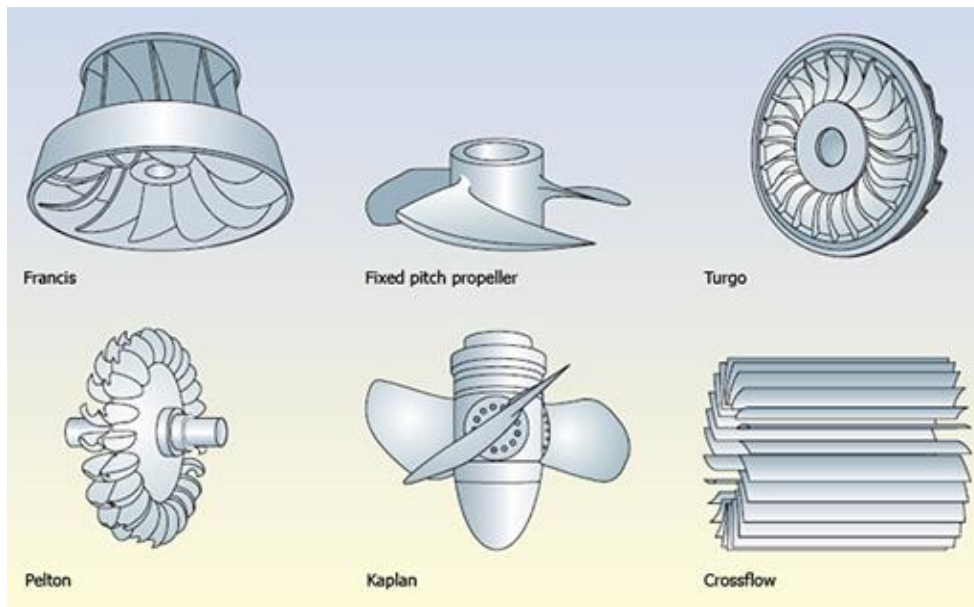


ILUSTRACIÓN 11. DIFERENTES TIPOS DE TURBINA (OPENLEARN, S.F.)

A medida que la importancia y la fiabilidad de la energía hidráulica fueron conocidas, la tecnología comenzó a evolucionar a gran ritmo. Esto supuso que la revolución hidroeléctrica estuviera en plena marcha.

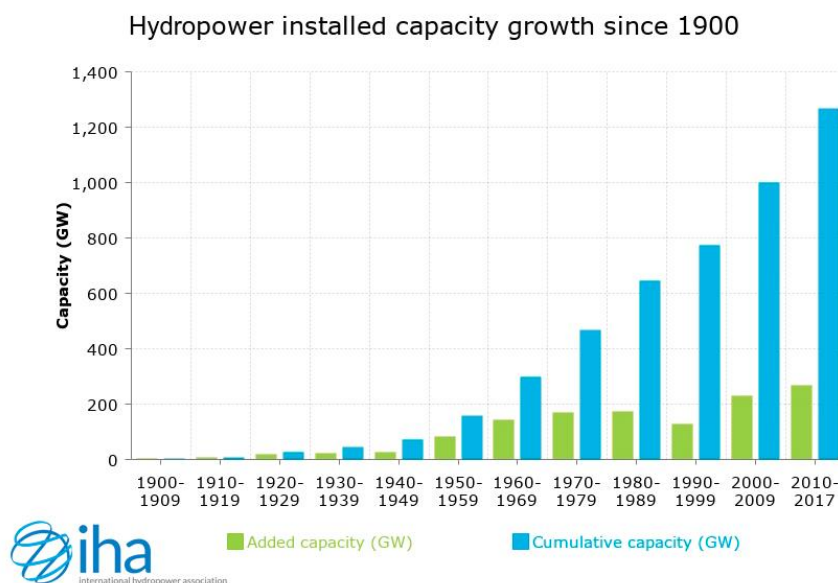


ILUSTRACIÓN 12. CRECIMIENTO DE LA POTENCIA INSTALADA EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN EL SIGLO XX (IHA, S.F.)

Entre 1920 y 1970 se construyeron miles de presas en Europa y Norteamérica llegando, en 2016, a suponer el 71% de toda la energía renovable producida en el mundo. A finales del siglo XX, la preocupación social y medioambiental debida al impacto producido por

las presas, así como el gran coste que estas suponían, condujo a esta fuente de energía a un decaimiento que aún continúa hoy en día.

#### 4.1.4 SIGLO XXI

##### a. EN EL MUNDO

En los últimos años ha comenzado una creciente tendencia hacia la sostenibilidad y la conservación del medioambiente. La quema de combustibles fósiles es la principal causa de la crisis climática y las energías renovables pueden llenar el hueco que el fin del uso de combustibles fósiles inevitablemente dejará. Entre el año 2000 y 2019 el consumo de energías renovables ha aumentado desde el 7% al 11,4%. La principal fuente de energía de entre las renovables sigue siendo la hidráulica, contribuyendo un 60% del mix de renovables en 2019. (Earth.org, 2021)

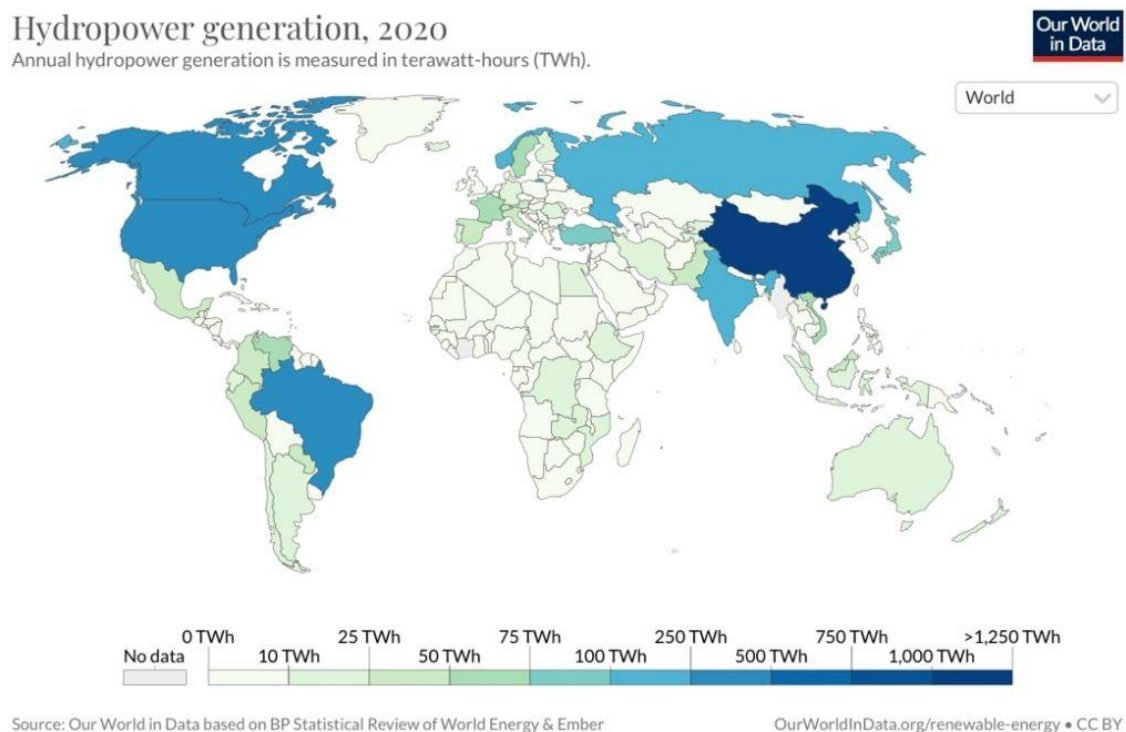


ILUSTRACIÓN 13. GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN 2020 EN EL MUNDO (OUR WORLD IN DATA, 2021)

A pesar de que estos datos pueden parecer alentadores la realidad en los países desarrollados es distinta. De hecho, hoy en día más presas son retiradas que construidas en Estados Unidos y Europa. Desde los años 70 la industria de la energía hidráulica ha dejado de construir presas en el primer mundo donde la mayoría de los lugares adecuados están ya ocupados. Sólo en los países en vías de desarrollo se están

construyendo presas aún más grandes como las llevadas a cabo en las cuencas de los ríos Mekong, Amazonas y Congo.

Sin embargo, los mismos problemas que preocupaban a finales del siglo pasado en Occidente están ocurriendo en los países en desarrollo. Algunos ejemplos como la alteración de la ecología de los ríos, deforestación, pérdida de biodiversidad acuática o la alteración de la vida de las personas que viven cerca de los embalses son algunos de estos problemas están siendo latentes en esas regiones (PNAS, 2018)

El ejemplo más claro de esta tendencia es China: desde el inicio del siglo XXI ha cuadruplicado la capacidad hidroeléctrica instalada, suponiendo más de la mitad del crecimiento mundial en este sector. En los próximos años se espera que megaproyectos como los de Wudongde (10200 MW) o Baihetan (16000 MW), ambos en el río Jinsha, se pongan en funcionamiento. (IHA, s.f.)

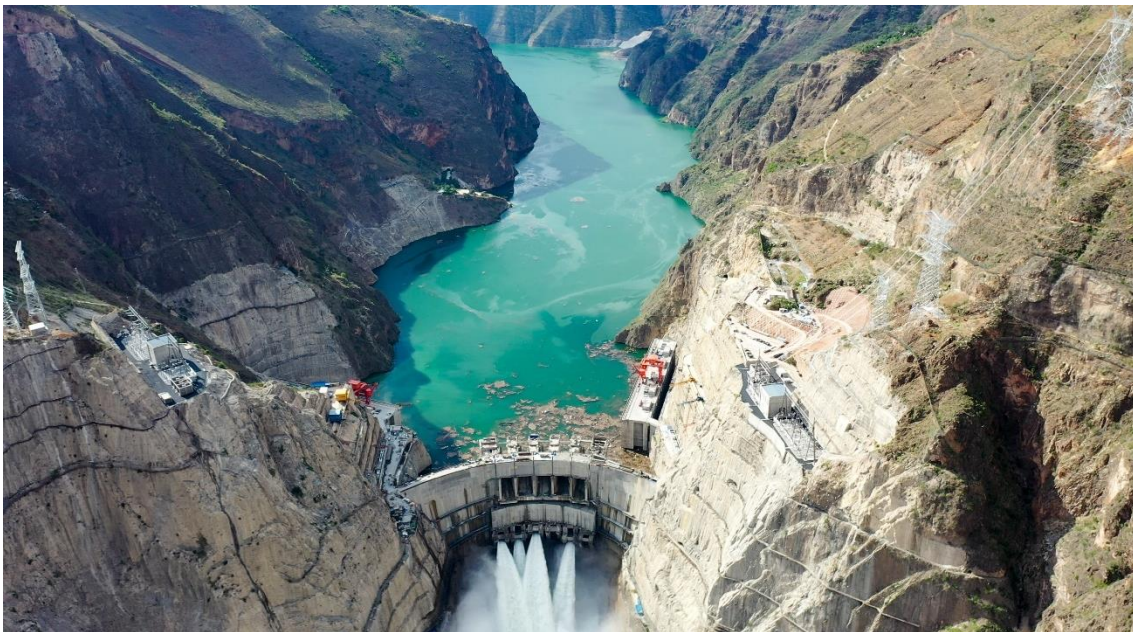


ILUSTRACIÓN 14. CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE WUDONGDE (GENERAL ELECTRIC, 2020)

**b. EN ESPAÑA**

Debido al gran esfuerzo humano y económico llevado a cabo en España a lo largo del siglo XX, nuestro país cuenta con uno de los mayores parques hidroeléctricos del mundo, figurando en octavo lugar entre los países de la OCDE en potencia hidroeléctrica en servicio. (Marín & Marín, 2010)

A pesar de esto, y al igual que en la gran mayoría de países desarrollados, desde principios del siglo XXI, la energía hidráulica ha pasado a un segundo plano en nuestro país debido a la gran atención que han adquirido otras fuentes de energía renovables como son la eólica o la solar. Aun así, la hidráulica se encuentra en crecimiento constante en cuanto a instalaciones y capacidad, aunque el porcentaje que representa dentro del global de la producción disminuye año tras año. De hecho, a mediados del siglo XX más del 90% de la energía producida en España era de origen hidráulico mientras que hoy en día este porcentaje no llega al 20%. (Roams, 2022)

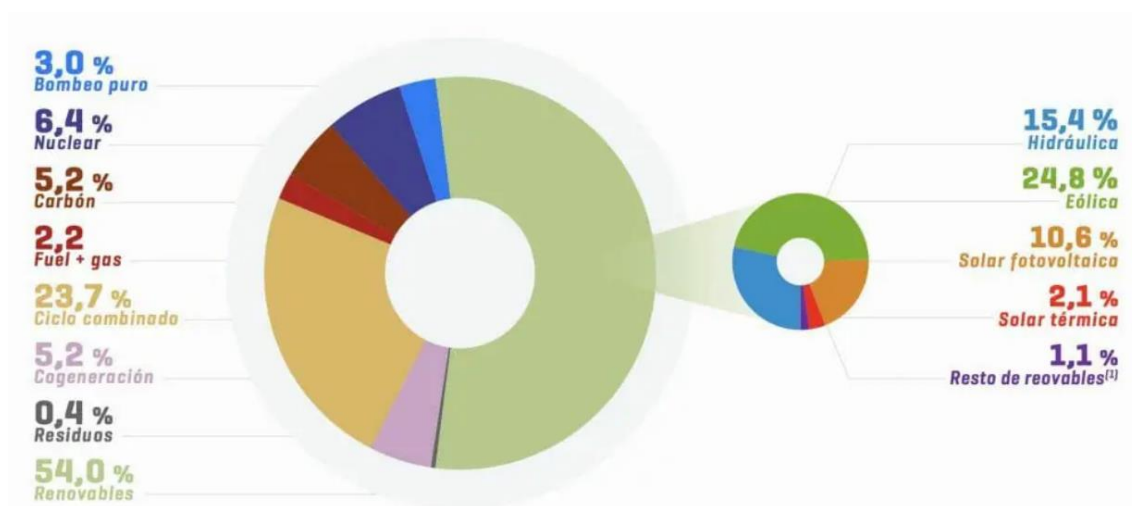


ILUSTRACIÓN 15. MIX ENERGÉTICO ESPAÑOL EN 2020 (RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, 2022)

### 4.1.5 FUTURO

El futuro de la energía hidráulica reside en los países en vías de desarrollo, especialmente China, donde megaproyectos de decenas de gigawattios como los ya mencionados continúan siendo proyectados año tras año.

En España y el resto de Occidente, la energía hidráulica tiene un futuro incierto. La tendencia hacia energías renovables más sofisticadas y novedosas como la eólica y la solar es inevitable, pero sucesos recientes como la necesidad en Europa de detener la dependencia de la energía proveniente de Rusia pueden generar una necesidad energética que estas fuentes de energía no sean capaces de satisfacer por si solas. Esto puede originar que los métodos de generación de energía más tradicionales, como son la hidráulica y la nuclear, puedan volver a suscitar el interés que perdieron en las últimas décadas.



ILUSTRACIÓN 16. PRESA DE LAS TRES GARGANTAS EN EL CURSO DEL RÍO YANGTSÉ, EN CHINA. LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MAS GRANDE DEL MUNDO (BRITANNICA, 2022)

## 4.1.6 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA

### HIDRÁULICA

<b>Ventajas</b>	<b>Renovable</b>	Debido al ciclo del agua, la disponibilidad de agua para generar electricidad es prácticamente ilimitada.
	<b>Producción regulable con la demanda</b>	La energía hidráulica se puede almacenar en embalses para su uso en situaciones de alta demanda.
	<b>Limpia</b>	Durante su operación no produce emisiones, al contrario que los combustibles fósiles
	<b>Control del caudal del río</b>	La construcción de embalse permite controlar el caudal de agua que lleva el río, pudiendo evitar inundaciones aguas debajo de la presa.
	<b>Bombeo de agua aguas arriba</b>	En casos en los que la demanda de energía es muy baja es posible bombear el agua de nuevo al embalse para generar electricidad en un momento más favorable económicamente.
	<b>Ventajas económicas</b>	Es independiente de la subida o bajada del precio de la materia prima, al contrario que los combustibles fósiles o la nuclear.
<b>Desventajas</b>	<b>Implica la construcción de presas y embalses</b>	El impacto de estas obras puede ser muy grande tanto para el ecosistema como para las personas que viven en la zona.
	<b>Impacto ecológico</b>	Dependiendo del caso, el impacto sobre la fauna la flora y sobre la calidad del agua puede ser elevado.
	<b>Impacto en el flujo del río aguas abajo de la presa</b>	A la salida de las turbinas el agua pierde prácticamente todo su sedimento, esto puede provocar la erosión del cauce del río o la retracción de deltas.
	<b>Dependencia del clima</b>	Existe la dificultad de la correcta predicción de la generación de energía ya que esta producción depende totalmente del caudal de agua que lleve el río.
	<b>Transporte de la energía</b>	Las centrales suelen estar alejadas de las zonas de consumo con lo que la inversión necesaria para transportar la energía es más alta que en el caso de otras fuentes de generación de energía.
	<b>Alta inversión económica inicial</b>	Los costes de construcción de las presas y embalses son muy elevados.

(GreenGeeks, s.f.) (Solar Energy, s.f.)

## 4.2 TURBINAS HIDRÁULICAS

### 4.2.1 INTRODUCCIÓN

Una turbina hidráulica es una turbomáquina motora hidráulica que convierte la energía almacenada en una masa de agua (un río o embalse) en energía cinética rotacional y, consecuentemente, en energía eléctrica mediante el uso de generadores. Las turbinas constan de una fila de palas fijadas a un rodete. El rodete gira debido al impacto de la diferencia de velocidad y presión del agua que golpea las palas. (ScienceDirect, 2018)

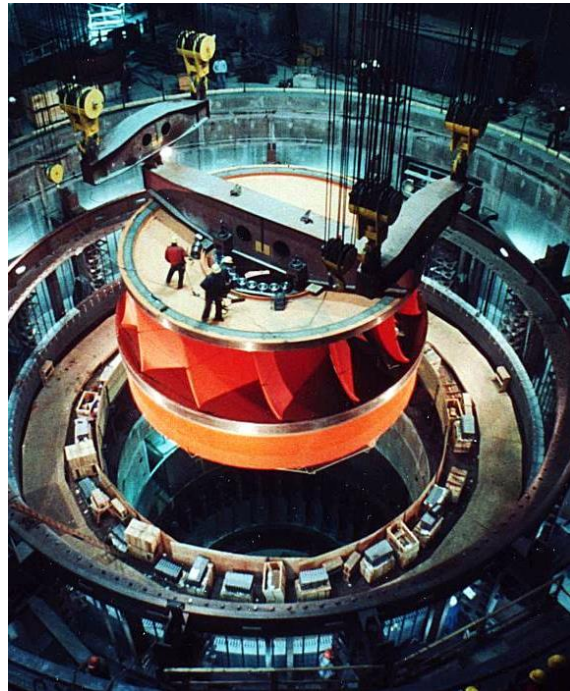


ILUSTRACIÓN 17. INSTALACIÓN DE UNA TURBINA FRANCIS (WIKIWAND, S.F.)

A la hora de seleccionar la turbina más adecuada para cada central hidroeléctrica es fundamental conocer tanto el salto de agua neto como el caudal que circulará por ella. En la figura de la derecha se puede ver qué turbina es más apropiada a tenor de estos dos valores. (Gomez & Posada, 2009)

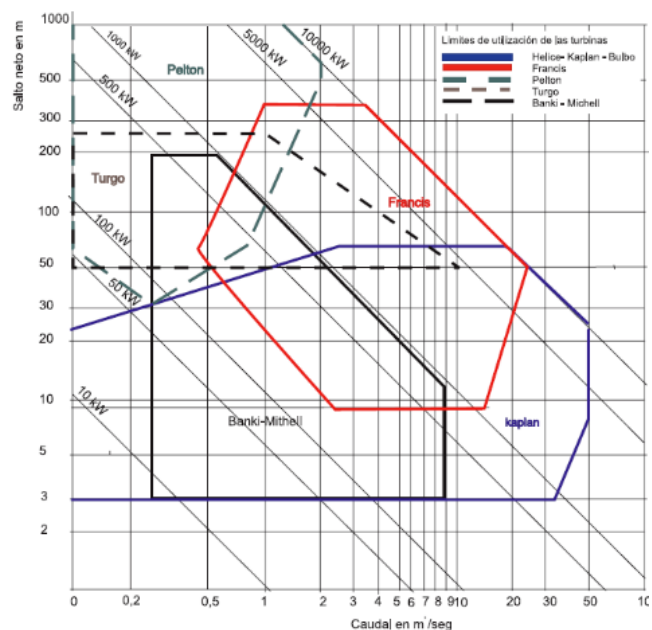


ILUSTRACIÓN 18. TURBINAS MÁS APROPIADAS A TENOR DEL CAUDAL Y DEL SALTO DE AGUA



### 4.2.2 CLASIFICACIÓN

Existen distintas formas de clasificar las turbinas hidráulicas, aunque principalmente se pueden categorizar según los siguientes criterios:

a. POR LA POSICIÓN DE SU EJE DE ROTACIÓN:

1) *Flujo cruzado o transversal:*

En una turbina de flujo cruzado el agua incide en las palas de forma tangencial al eje de rotación. Es una evolución directa de los molinos de agua y constan de cucharas en vez de álabes. Cabe destacar que trabajan mejor con saltos de agua grandes y caudales pequeños. Un ejemplo es la turbina Pelton.

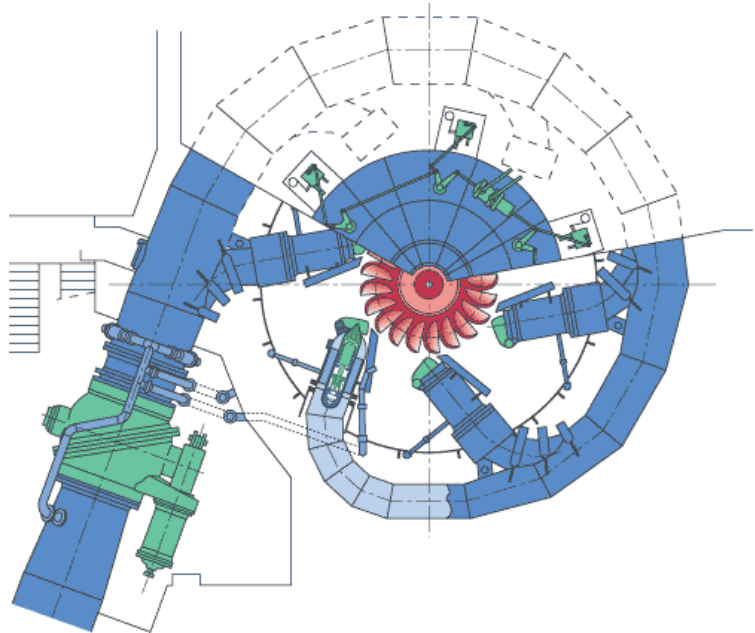


ILUSTRACIÓN 19. TURBINA PELTON DE FLUZO CRUZADO

2) *Flujo radial:*

En una turbina de flujo radial el agua incide en las palas radialmente y sale axialmente. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua y caudales medios, siendo consideradas como turbinas de reacción. Un ejemplo es la turbina Francis.

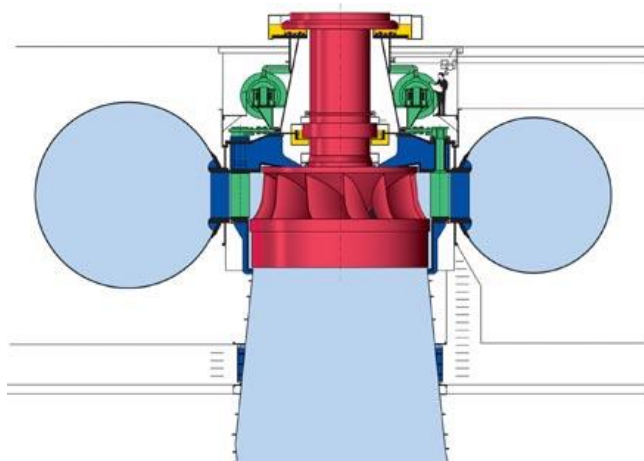


ILUSTRACIÓN 20. TURBINA FRANCIS DE FLUJO RADIAL

3) *Flujo axial:*

En una turbina de flujo axial el agua fluye paralela al eje de la turbina. Permiten variar el ángulo de sus palas durante el funcionamiento. Funcionan mejor en saltos de agua pequeños y con grandes caudales, y son consideradas como turbinas de reacción. Un ejemplo es la turbina Kaplan. (Mechanical E-Notes, s.f.)

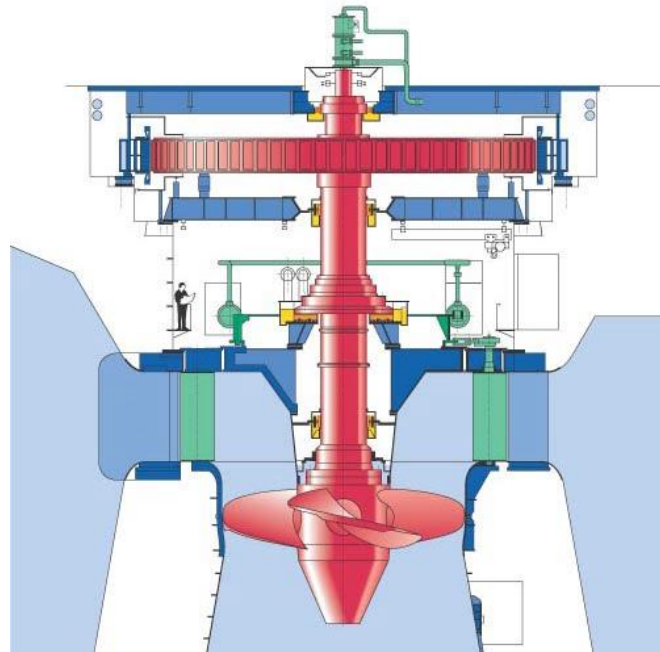


ILUSTRACIÓN 21. TURBINA KAPLAN DE FLUJO AXIAL

b. POR LA FUERZA APROVECHADA:

1) *Arrastre o de acción*

Una turbina de arrastre generalmente usa la velocidad del agua para mover el rodete y descarga a velocidad atmosférica. Esta tipología carece de succión en la parte inferior de la turbina, de modo que el agua fluye fuera del rotor después de golpear el rodete. Las turbinas de acción son generalmente adecuadas para saltos de agua elevados y con poco caudal. Los dos tipos fundamentales son las turbinas Pelton y de flujo cruzado.

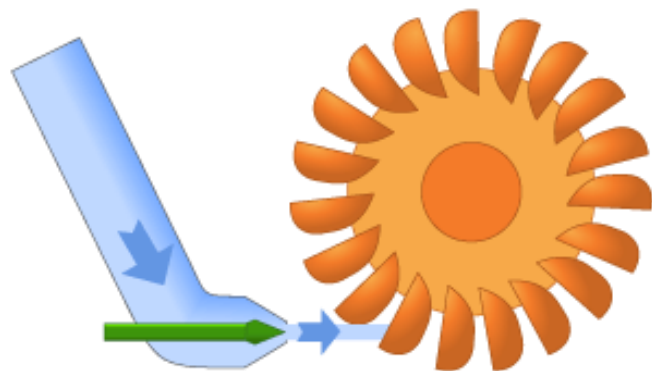


ILUSTRACIÓN 22. TURBINA PELTON POR ARRASTRE

## 2) *Sustentación o de reacción*

Una turbina de reacción genera energía a partir de la combinación de las fuerzas de presión y cinética del agua. El rodete es colocado directamente en el flujo de agua, permitiendo que el agua fluya sobre las palas y no golpeándolas individualmente. Son

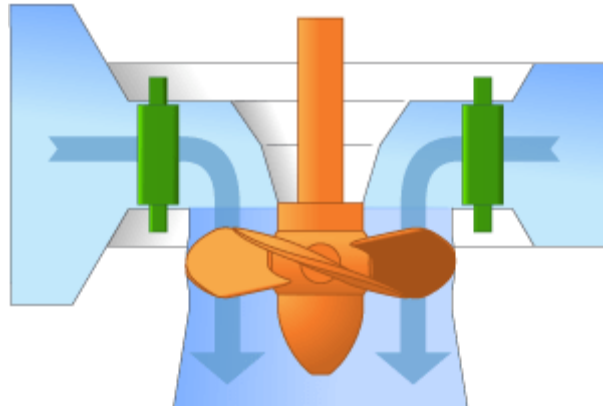


ILUSTRACIÓN 23. TURBINA KAPLAN POR SUSTENTACIÓN

adecuadas para saltos de agua pequeños y con caudales grandes y es el tipo de turbina de uso más habitual hoy en día. Los dos tipos más comunes son la Kaplan y la Francis. (Office of energy efficiency and renewable energy, s.f.)

### 4.2.3 TURBINAS HIDROCINÉTICAS

Este Trabajo Fin de Grado trata el estudio experimental y numérico para la caracterización de una turbina Savonius en un canal en condiciones de baja velocidad de corriente de agua. Esta tipología se denomina turbina hidrocínética ya que únicamente aprovecha el término cinético (velocidad).



ILUSTRACIÓN 24. TURBINA HIDROCINÉTICA DE FLUJO AXIAL (LINQUIP,

Este tipo de turbinas son de gran <sup>2021)</sup>

utilidad para su uso en condiciones de baja velocidad como pueden ser ríos o canales en los que la construcción de grandes infraestructuras civiles, como presas o embalses, necesarios para el funcionamiento de las grandes centrales hidroeléctricas, no es posible o rentable. Esta tecnología minimiza el costo y el impacto medioambiental por lo que en los últimos años está siendo objeto de diversos estudios.



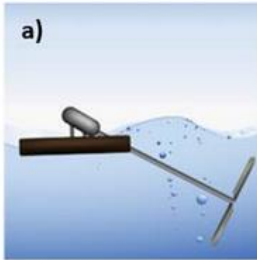
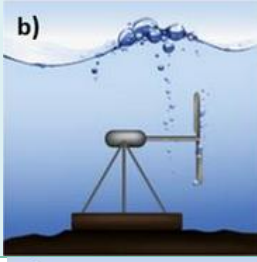
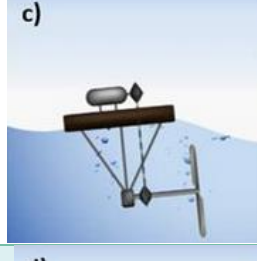
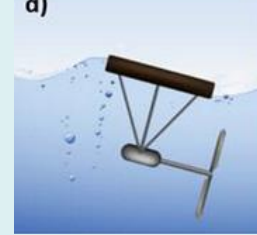
ILUSTRACIÓN 25. TURBINA HIDROCINÉTICA (FREE FLOW POWER CORPORATION, S.F.)

Las turbinas hidrocínéticas aprovechan la energía cinética almacenada en corrientes marinas, ríos y canales artificiales, convirtiéndola en energía mecánica sin interrumpir el flujo natural del agua. Sin embargo, presentan una gran desventaja con respecto a las turbinas hidráulicas tradicionales ya que el rendimiento obtenido es mucho menor por

lo que la rentabilidad económica de las instalaciones debe ser estudiada en detalle. (Cardona-Mancilla, Río, Chica-Arrieta, & Hincapié-Zuluaga, 2018)

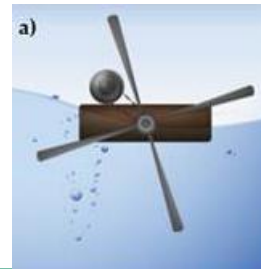
a. CLASIFICACIÓN

El criterio principal de clasificación de este tipo de turbinas es el de la orientación de su eje de rotación con respecto a la dirección del flujo de agua, clasificándose en turbinas de eje horizontal y flujo axial o de eje vertical y flujo cruzado. En las dos tablas siguientes se pueden varios tipos de turbina para ambos criterios de clasificación.

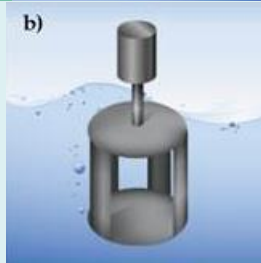
<i>Turbina de hidrocineéticas de flujo axial</i>	<i>Eje inclinado</i>	
	<i>Amarre rígido</i>	
	<i>Generador no sumergido</i>	
	<i>Generador sumergido</i>	

*Turbina de hidrocineéticas de flujo cruzado*

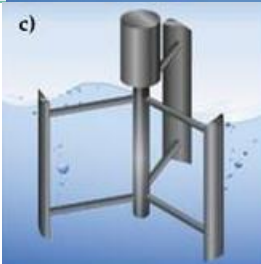
*De eje horizontal*



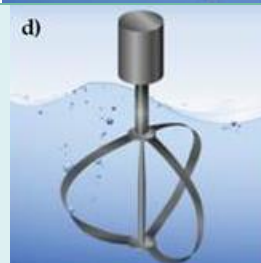
*Jaula de ardilla Darrieus*



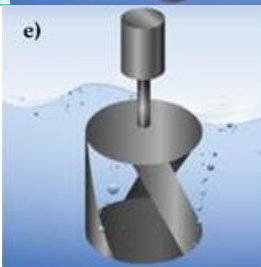
*H-Darrieus*



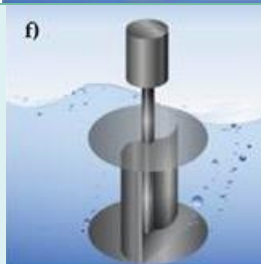
*Darrieus*



*Gorlov*



*Savonius*



(Vermaak, Kusakana, & Koko, 2013)

**b. ESTADO DEL ARTE**

A continuación, se presentan algunos proyectos de turbinas hidrocinéticas que están actualmente en funcionamiento o comercialización.

*OCEAN RENEWABLE POWER COMPANY*

Esta empresa tiene a la venta tres tipos de sistema de generación: RivGen, TidGen y OcGen, basados todos en la misma turbina de eje vertical pero adaptada a distintas situaciones. (ORPC, s.f.)

*RIVGEN*

Diseñada para la generación de electricidad en ríos, permite conectarla directamente a redes eléctricas comunitarias siendo adecuada para abastecer de energía a pequeñas poblaciones aisladas.

Detalles de la turbina

<i>Potencia (kW)</i>	25
<i>Velocidad de corriente (m/s)</i>	2,25



ILUSTRACIÓN 26. RIVGEN

*TIDGEN*

Diseñada para la generación de electricidad en corrientes de marea. En 2012 una unidad fue instalada en Maine. Fue el primer sistema de generación mareomotriz conectado a la red en EE. UU.

Detalles de la turbina

<i>Potencia (kW)</i>	150
<i>Profundidad máxima (m)</i>	45



ILUSTRACIÓN 27. TIDGEN

*OCGEN*

Diseñada para la generación de electricidad en corrientes oceánicas profundas. Es el diseño más potente de la empresa, aunque aún no ha sido puesto en funcionamiento. Cada rotor tiene una potencial nominal de entre 1 y 2 MW.

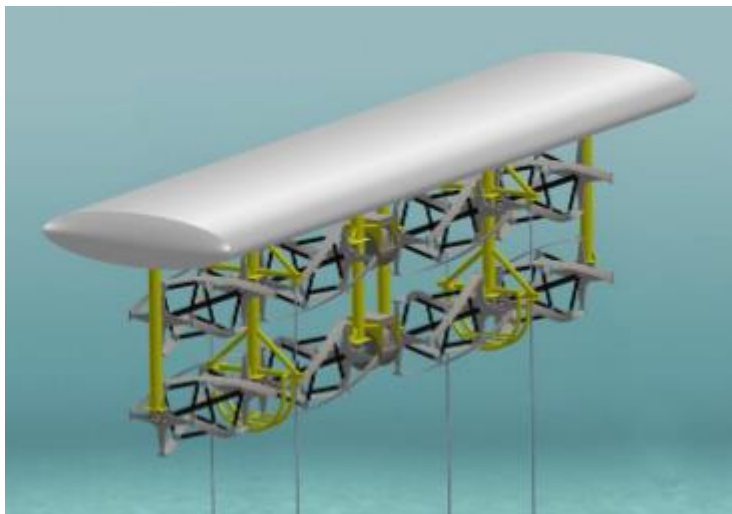


ILUSTRACIÓN 28. OCGEN



*ATLANTIS RESOURCE CORPORATION LTD.*

Se presentan dos proyectos desarrollados por esta empresa de Singapur. (Simec Atlantis Energy, s.f.)

*NEREUS*

Es una turbina de marea diseñada para aguas poco profundas. Está formada por una serie de alabes sobre una banda deslizante, fue probada en 2008 y conectada a la red en Australia.

Detalles de la turbina

<i>Potencia (kW)</i>	400
<i>Profundidad máxima (m)</i>	25



ILUSTRACIÓN 29. NEREUS

*SOLON*

Esta turbina está diseñada para grandes profundidades y tiene una potencia nominal de 500 kW. Se probó con éxito en agosto de 2008.



ILUSTRACIÓN 30. SOLON

#### 4.2.4 SAVONIUS

La turbina estudiada en el presente TFG es de tipo Savonius. A continuación, se describe el origen de esta turbina, así como su funcionamiento y los usos que se le han dado históricamente.

##### a. INTRODUCCIÓN

La turbina de tipo Savonius fue inventada y patentada por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1922. La turbina consta de dos medios cilindros fijados en los lados opuestos de un eje vertical. El fluido que incide en la turbina se pone en contacto con las superficies de estos semicilindros que están orientadas de forma opuesta (una cóncava y otra convexa) haciendo girar al rotor. (Wenehenubun, Saputra, & Sutanto, 2015)



ILUSTRACIÓN 31. TURBINAS EÓLICAS SAVONIUS EN FINLANDIA (WINDSIDE, S.F.)

##### b. FUNCIONAMIENTO

El mecanismo principal que genera la rotación en los rotores tipo Savonius viene de la diferencia en la fuerza de arrastre entre los lados cóncavo y convexo de las palas, haciendo de ésta una turbina de arrastre. Cabe destacar que en este tipo de rotores la velocidad de rotación del rotor nunca puede exceder la velocidad del fluido incidente. Ésta es la razón principal por la que su TSR (*Tip Speed Ratio*) no puede exceder la unidad (se entrará más en detalle sobre este y otros conceptos en el apartado de marco teórico). (Dewan, Gautan, & Goyal, 2021). Esto provoca que la velocidad de rotación de este tipo de turbinas sea baja, pero generen un gran momento angular.

Además, la eficiencia de las turbinas Savonius es bastante más baja que la de otras turbinas de funcionamiento por sustentación como la Darrieus, llegando únicamente a convertir alrededor del 15% de la energía con la que el fluido incide en la turbina en energía mecánica.

### c. Uso

La mayor ventaja que poseen los rotores Savonius es su simplicidad, ya que no son necesarios métodos sofisticados ni habilidades técnicas avanzadas para su fabricación. Esto hace que su uso se especialmente interesante en países en vías de desarrollo. Cabe destacar que, si bien debido a su baja velocidad de rotación no se alcanzan potencias eléctricas interesantes comercialmente, éstas pueden utilizarse para otras aplicaciones como la molienda de grano o bombeos (ScienceDirect, 2014).

En el caso de la generación de energía eólica, las turbinas Savonius son útiles en lugares donde la dirección del viento es muy variable ya que rotor siempre está orientado al viento. En comparación con el otro tipo de turbinas de eje vertical, las Darrieus, las Savonius, aunque mucho menos eficientes por ser de arrastre, no necesitan una fuente de energía inicial para comenzar la rotación de las turbinas.

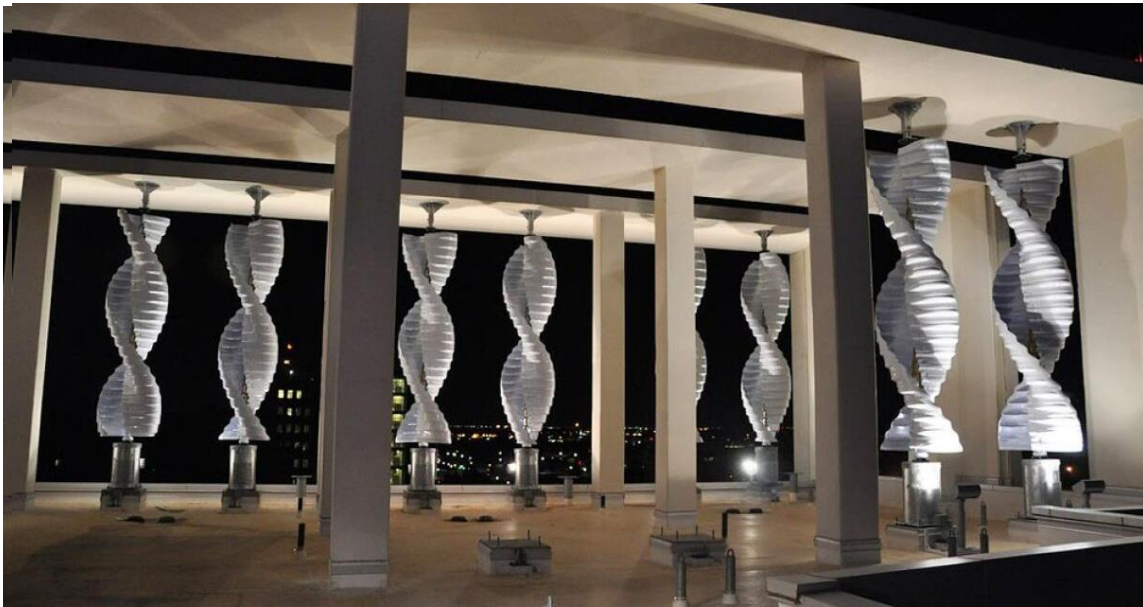


ILUSTRACIÓN 32. PARQUE EÓLICO DE TURBINAS SAVONIUS EN LA AZOTEA DEL OKLAHOMA MEDICAL RESEARCH FOUNDATION (NEW ATLAS, S.F.)

d. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presentan algunos productos comerciales de turbinas Savonius, para uso eólico, ya que, como se ha visto anteriormente, este tipo de turbinas de arrastre funcionan mejor como rotor eólico que como hidráulico.

LS SAVONIUS 3.0 DE LUVSIDE

**Detalles de la turbina**

<b>Potencia (W)</b>	300
<b>Diámetro (m)</b>	2,2
<b>Altura (m)</b>	4

(LuvSide, s.f.)



DARRIEUS/SAVONIUS DE DORNIER

**Detalles de la turbina**

<b>Potencia (W)</b>	550
<b>Diámetro (m)</b>	5,5
<b>Altura (m)</b>	10,5

(Dornier, s.f.)



## 4.3 IMPRESIÓN ADITIVA

### 4.3.1 INTRODUCCIÓN

Para la fabricación de la turbina Savonius utilizada en este TFG se hizo uso de la impresión en 3D. La impresión 3D, o fabricación aditiva, es el proceso de crear un objeto sólido en tres dimensiones a partir de un archivo digital.

La creación de los objetos impresos en 3D se consigue mediante el uso de un proceso aditivo, es decir, colocando sucesivas capas de material hasta que el objeto está completo. Cada una de estas capas se puede ver como una rodaja muy fina de la sección transversal del objeto.

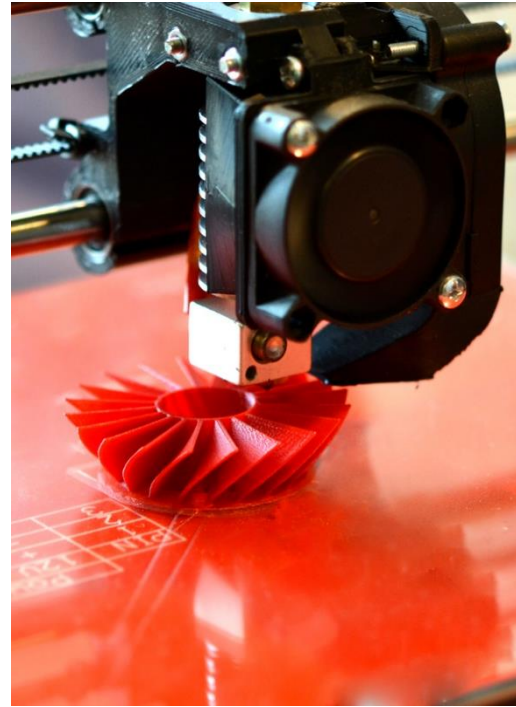


ILUSTRACIÓN 33. IMPRESIÓN 3D (EIT RAWMATERIALS, 2021)

### 4.3.2 USOS

La impresión en 3D comprende muchos tipos de tecnologías y materiales ya que está siendo utilizada en prácticamente todos los sectores industriales. Algunos ejemplos de los usos más comunes de esta tecnología son:

- Productos dentales.
- Prótesis.
- Modelos arquitectónicos a escala y maquetas.
- Reconstrucciones de fósiles.
- Reconstrucción de evidencia forense.

(3DPrinting.com, s.f.)

La utilización de este tipo de tecnología ha sido muy útil para el objetivo del presente proyecto ya que permite obtener piezas con geometrías complejas en periodos de tiempo mucho más cortos que con otras técnicas de fabricación y a un coste razonablemente inferior.

## 5. MARCO TEÓRICO

En este apartado se abordarán algunos conceptos fundamentales para la correcta caracterización de las turbinas hidrocínéticas como son el coeficiente de potencia o el TSR. Una vez calculados estos valores se podrá evaluar el funcionamiento de la turbina y obtener su caracterización completa de su fase de potencia.

### 5.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Ya que las turbinas hidrocínéticas, como la que se trata el presente TFG, aprovechan la energía cinética de la corriente de agua que las atraviesa, la potencia teóricamente disponible para su aprovechamiento viene dada por la siguiente fórmula.

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h \cdot d \cdot v^3$$

En la que:

- $\rho$  es la densidad del fluido en  $\frac{kg}{m^3}$ .
- $h$  y  $d$  son la altura y el diámetro de la turbina en metros, es decir, el área barrida por los alabes del rotor.
- $v$  es la velocidad del fluido que atraviesa dicha área en  $\frac{m}{s}$ .

Sin embargo, se debe tener en cuenta los rendimientos tanto de la propia turbina como del equipo generador, yéndose gran parte de la energía en pérdidas mecánicas y eléctricas. Estas pérdidas vienen representadas por un coeficiente denominado coeficiente de potencia (que se tratará en próximos apartados). Quedando la expresión de la potencia real generada por la turbina de la siguiente forma:

$$P_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h \cdot d \cdot v^3 \cdot C_p$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente adimensional de potencia.

### 5.1.1 FLUJO EN CAMPO ABIERTO Y LÍMITE DE BETZ

En 1919 el físico alemán Albert Betz determinó que la eficiencia máxima teórica para una turbina eólica es del 59,3%, es decir, como máximo, solo se puede convertir en energía eléctrica un 59,3% de la energía cinética del viento que atraviesa el área barrida por la turbina. Esto se conoce como límite de Betz y es el valor máximo que puede tomar el coeficiente de potencia.

$$C_{p\ max} = \frac{16}{27} \cong 59,3\%$$

En realidad, las turbinas eólicas actuales no alcanzan este límite y suelen tener un rendimiento de entre el 35 y el 45%, ya que el funcionamiento de una turbina se basa en frenar el viento con el objetivo de extraer energía. Así, en una turbina con una eficiencia del 100%, todo el viento quedaría parado al entrar en contacto con ella impidiendo el flujo de aire. (Afework, Hanania, Stenhouse, & Donev, 2018)

En el caso de las turbinas hidrocinéticas este mismo límite es aplicable, pero únicamente en condiciones de campo abierto, es decir, en casos donde no haya paredes cercanas a la turbina. Las turbinas hidrocinéticas se suelen colocar en canales o en ríos donde el flujo no se puede considerar libre, si no confinado. Por ello, en 2008, surge la teoría de Houslby.

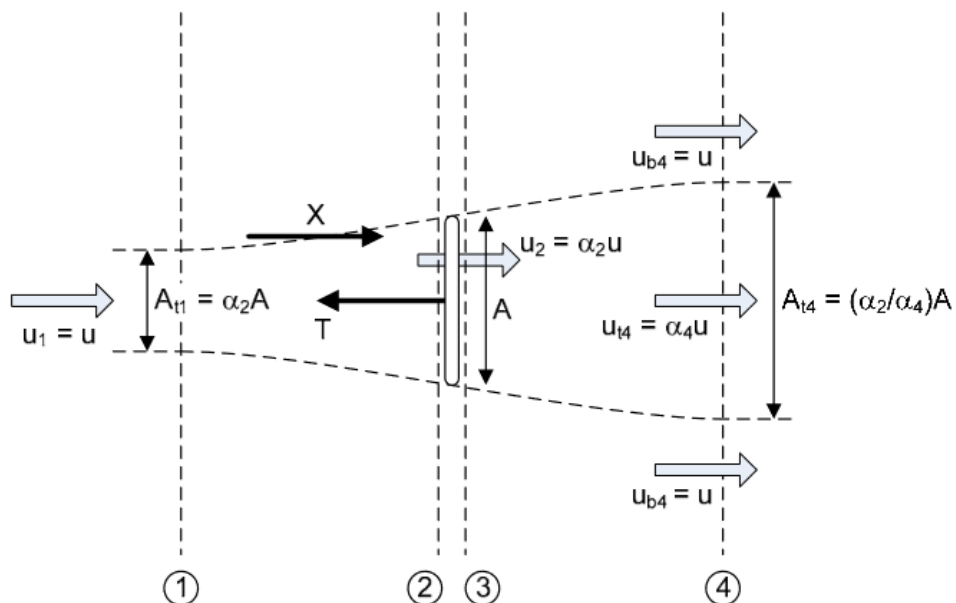


ILUSTRACIÓN 34. TEORÍA DE BETZ DEL DISCO ACTUADOR EN CAMPO ABIERTO (HOULSBY, DRAPER, & OLDFIELD, 2008)

## 5.2 TEORÍA DE HOULSBY

En flujo confinado aparecen dos fenómenos que no permiten que se pueda aplicar el límite de Betz: la lámina libre y el bloqueo. Cuanto menor es la distancia de la turbina a la lámina libre de la corriente de agua y cuanto mayor es la cantidad de agua que es bloqueada por la presencia de la turbina en el canal, mayores son los valores de potencia. Houlby adapta la teoría del disco actuador a flujos confinados de la siguiente manera:

Las hipótesis que plantea Houlby son:

- Disco sumergido en el interior de un canal sin fricción y con la solera y la lámina de agua paralelas.
- Flujo aguas arriba subcrítico ( $F_r < 1$ ).
- Al atravesar el disco, el flujo de agua se divide en dos zonas, la que lo atraviesa y la que lo rodea.
- Debido al descenso de velocidad al atravesar el disco, se genera una zona de mezcla aguas abajo.
- Velocidad constante a lo largo de toda la sección: flujo y presión constante.

A partir de esto, Houlby obtiene su teoría del disco actuador para flujos en canales, estableciendo que la potencia producida por la turbina se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P_{turb} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h \cdot d \cdot v^3 \cdot B \cdot \alpha_2 \cdot (\beta_4^2 - \alpha_4^2)$$

Siendo entonces el coeficiente de potencia:

$$C_p = B \cdot \alpha_2 \cdot (\beta_4^2 - \alpha_4^2)$$

Donde:

- $B$  es el coeficiente de bloqueo adimensional.
- $\alpha_4$  es el coeficiente de velocidad del flujo que pasa por el disco.
- $\beta_4$  es el coeficiente de velocidad del flujo que bordea el rotor.
- $\alpha_2$  es el coeficiente de velocidad de flujo, dependiente de  $B$ ,  $\beta_4$  y  $\alpha_4$ :



$$\alpha_2 = \frac{2(\beta_4 + \alpha_4) - \frac{(\beta_4 - 1)^3}{B\beta_4(\beta_4 - \alpha_4)}}{4 + \frac{(\beta_4^2 - 1)}{\alpha_4\beta_4}}$$

Para satisfacer la siguiente ecuación deben cumplirse las condiciones que se indican a continuación:

$$\frac{F_r^2}{2}\beta_4^4 + 2\alpha_4 F_r^2 \beta_4^3 - (2 - 2B + F_r^2)\beta_4^2 - (4\alpha_4 + 2\alpha_4 F_r^2 - 4)\beta_4 + \left(\frac{F_r^2}{2} + 4\alpha_4 - 2B\alpha_4^2 - 2\right) = 0$$

- Se especifica el número de Froude aguas arriba:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

- El coeficiente de bloqueo:  $0 \leq B \leq 1$
- El coeficiente de velocidad adimensional:  $0 \leq \alpha_4 \leq 1$

(Houlsby, Draper, & Oldfield, 2008)

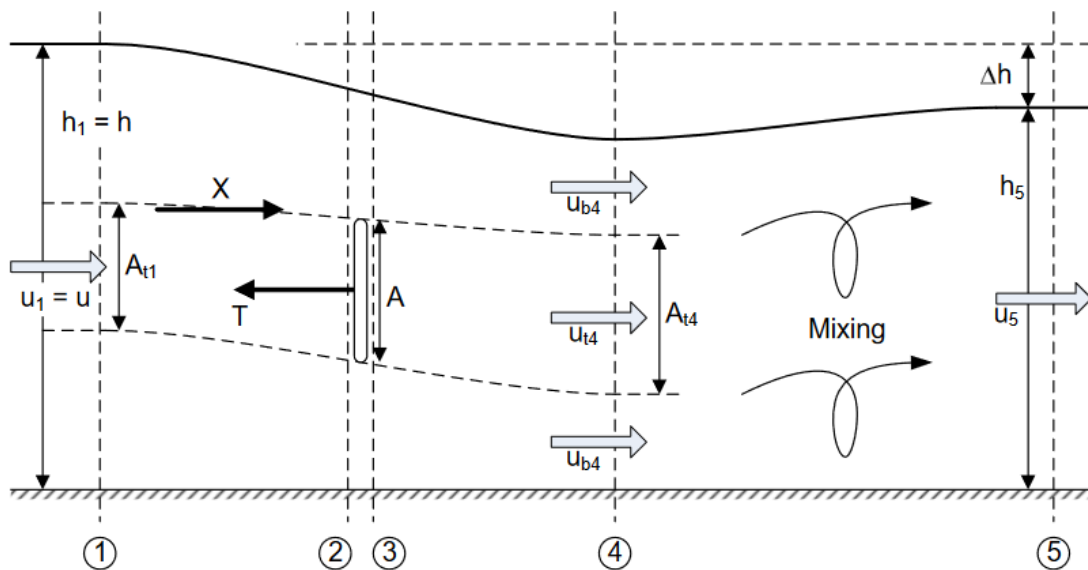


ILUSTRACIÓN 35. TEORÍA DE HOULSBY DEL DISCO ACTUADOR EN CANALES (HOULSBY, DRAPER, & OLDFIELD, 2008)

### 5.3 COEFICIENTE DE POTENCIA

Para definir la eficiencia de una turbina, en su forma más general, utilizamos el coeficiente de potencia. Éste se define como la fracción de energía del fluido que es posible transformar en energía mecánica rotacional. Como se ha comentado anteriormente, se define de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{\text{Potencia que extrae la turbina}}{\text{Potencia teóricamente disponible en el flujo}}$$

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h \cdot d \cdot v^3}$$

Donde  $T$  es el par de fuerza en  $Nm$  y  $\omega$  es la velocidad angular de la turbina en  $rad/s$ .

(Restrepo, 2020)

### 5.4 TIP SPEED RATIO (TSR)

El otro parámetro fundamental para el estudio de las turbinas hidrocinéticas, junto con el coeficiente de potencia, es el TSR o *Tip Speed Ratio*. Este parámetro relaciona la velocidad del fluido en la punta del álabe y la velocidad de la corriente. Se define como:

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{v}$$

Donde  $R$  es el radio de la turbina en metros y  $\omega$  es la velocidad angular de la turbina en  $rad/s$ .

La relación entre el coeficiente de potencia  $C_p$  y el TSR permite estudiar el rendimiento de las turbinas hidrocinéticas. En la siguiente figura se pueden ver algunas de estas relaciones dependiendo del tipo de rotor.

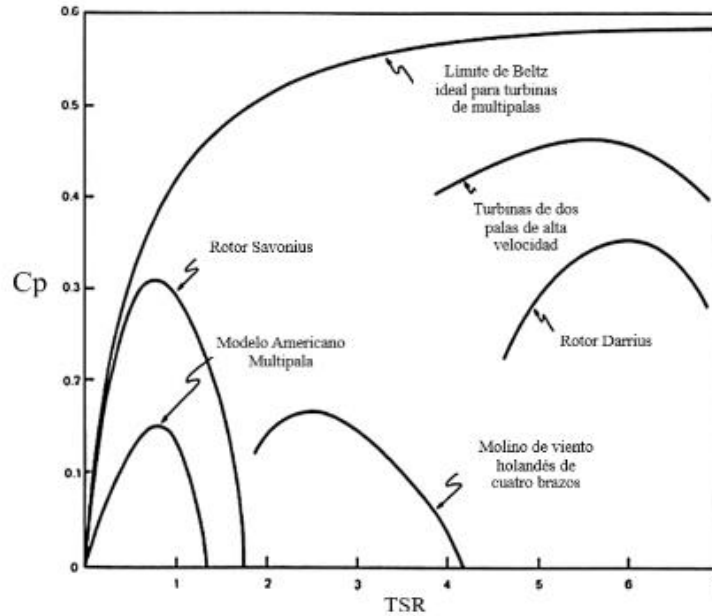


ILUSTRACIÓN 36. RELACIÓN COEFICIENTE DE POTENCIA – TSR (RESTREPO, 2020)

### 5.5 FENÓMENO DEL BLOQUEO

Como se ha visto, al hablar de la teoría de Houslby para flujos confinados en canales, el coeficiente de potencia, y a su vez, el rendimiento de la turbina y la potencia extraíble, dependen de un parámetro denominado coeficiente de bloqueo,  $B$ .

Este parámetro define el fenómeno que ocurre cuando el espacio relativo entre la posición del rotor y de las paredes y solera del canal genera un bloqueo de la corriente del fluido. Este fenómeno provoca que la velocidad de la corriente al atravesar el área barrida por la turbina aumente, produciéndose una aceleración del flujo.

Como se está tratando el estudio de turbinas hidrocinéticas que funcionan a bajas velocidades de agua ( $< 1 \text{ m/s}$ ), este aumento de la velocidad no es para nada despreciable y es aprovechado por la turbina para extraer más potencia.

El coeficiente  $B$  se define de esta forma:

$$B = \frac{A_{tur}}{A_{canal}}$$

Donde  $A_{tur}$  es el área barrida por los alabes de la turbina en  $m^2$  y  $A_{canal}$  es el área transversal del canal en  $m^2$ .

### 5.5.1 CORRECCIÓN AL FENÓMENO DE BLOQUEO

Para corregir este fenómeno existen diversos métodos, basándose todos en la teoría del disco actuador adaptada al caso de flujo bloqueado. Estos métodos intentan obtener una velocidad equivalente de flujo libre en función de algunas de las variables comentadas anteriormente. Esto genera una relación entre la velocidad del tanque  $U_t$  y la velocidad del flujo libre  $U_f$ , corrigiendo de esta forma los parámetros característicos.

$$TSR_{correctado} = TSR \frac{U_t}{U_f}$$

$$Ct_{correctado} = Ct \left( \frac{U_t}{U_f} \right)^2$$

$$Cp_{correctado} = Cp \left( \frac{U_t}{U_f} \right)^3$$

En la tabla siguiente se pueden ver los métodos de corrección más comunes, cada uno que la definición de  $\frac{U_t}{U_f}$  correspondiente. Cabe destacar que ninguno de estos métodos considera los efectos de la superficie libre. (Valdés, 2019)

Method	$U_t/U_f$	Obs.
Glauert	$\left( 1 + \frac{\beta C_T}{4\sqrt{1-C_T}} \right)^{-1}$	only if $C_T < 1$
Maskell	$\sqrt{1 - \epsilon \beta C_T}$	$\epsilon$ empirical factor
Pope	$(1 + \epsilon_i)^{-1}$	$\epsilon_i$ empirical factor
Mikkelsen	$\left( u + \frac{C_T}{4u} \right)^{-1}$	$u = 1 - a$
Bahaj	$\frac{U_1/U_T}{\left( \frac{U_1}{U_T} \right)^2 + \frac{C_T}{4}}$	$U_1$ as in orig. art.
Werle	$1 - \beta$	preliminary method

ILUSTRACIÓN 37. MÉTODOS DE CORRECCIÓN DE BLOQUEO

## 6. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 6.1 INTRODUCCIÓN

El estudio experimental de la turbina que concierne a este TFG se ha llevado a cabo en su totalidad en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres, haciendo uso del túnel hidrodinámico allí presente. En este apartado del trabajo se explicará a fondo todo el material usado, así como el procedimiento llevado a cabo para la obtención de los datos y los resultados a los que se ha llegado mediante el tratamiento de los datos. Finalmente se discutirán los resultados para cerrar el capítulo.

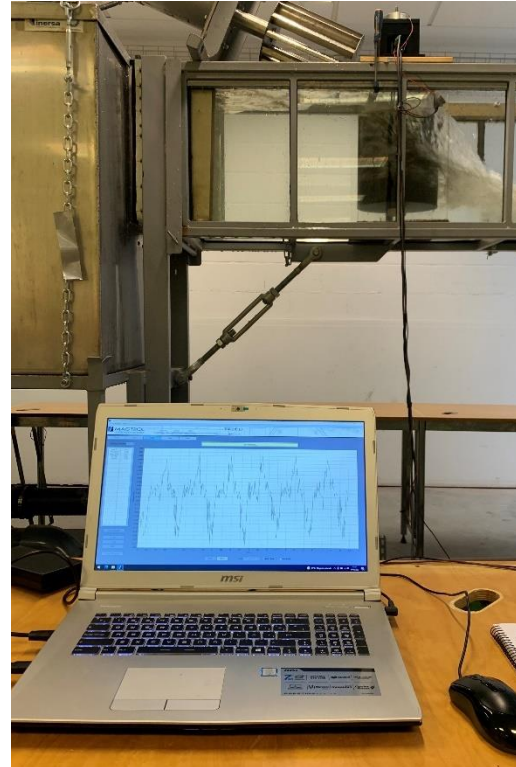


ILUSTRACIÓN 38. EQUIPO EXPERIMENTAL

### 6.2 MATERIALES

Fundamentalmente, los materiales utilizados se pueden clasificar en tres categorías:

1. Turbina hidrocínética.
2. Túnel hidrodinámico.
3. Sistema para la captación de datos.

En los siguientes apartados se entrará más en detalle en cada uno de ellos.

### 6.2.1 TURBINA HIDROCINÉTICA

El presente TFG trata el estudio de una turbina de arrastre de eje vertical tipo Savonius. Para ello, se ha diseñado y fabricado una turbina de estas características mediante el uso de tecnología de impresión aditiva en filamento de nylon (PA).

En la tabla de la derecha se detallan las dimensiones de la turbina relevantes para el estudio, en la imagen inferior se puede ver la propia turbina.

*Dimensiones de la turbina*

*Altura (m)* 0,3

*Diámetro (m)* 0,28



ILUSTRACIÓN 39. TURBINA SAVONIUS DEL ESTUDIO

## 6.2.2 TÚNEL HIDRODINÁMICO

El túnel hidrodinámico utilizado para caracterización de la turbina fue diseñado y construido por el Área de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres y está localizado en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de esta misma escuela.

El banco de ensayos hidráulico consta, principalmente, de los siguientes elementos:

- a. *Tanque de aspiración*
- b. *Equipo de bombeo*
- c. *Variadores de potencia*
- d. *Tanque de tranquilización*
- e. *Canal de ensayos*
- f. *Compuerta de control*
- g. *Sistema para la colocación de las turbinas*
- h. *Elementos auxiliares*

A continuación, se comenta en mayor profundidad cada uno de los elementos.



ILUSTRACIÓN 40. TUNEL HIDRODINÁMICO

a. TANQUE DE ASPIRACIÓN

Para el almacenamiento del agua requerida para realizar los ensayos se hace uso del tanque de aspiración. Este tanque está fabricado en acero inoxidable AISI 304, con un espesor de las paredes de 3 mm. En la tabla de la derecha se especifican las dimensiones del tanque.

A 10 cm de la solera, en uno de los laterales, existen dos orificios de 110 mm de diámetro que sirven para la aspiración del agua que posteriormente será enviada al tanque de tranquilización.

Dimensiones del tanque de aspiración

<i>Alto (m)</i>	1,3
<i>Ancho (m)</i>	1,5
<i>Largo (m)</i>	2,5
<i>Capacidad (m<sup>3</sup>)</i>	4,88



ILUSTRACIÓN 41. TANQUE DE ASPIRACIÓN



## b. EQUIPO DE BOMBEO

El movimiento del agua desde el tanque de aspiración al tanque de tranquilización es realizado mediante el uso de dos bombas situadas bajo este último. La potencia con la que las bombas extraen el agua, es decir, el caudal que va a discurrir por el canal se determina mediante dos variadores de potencia, que permite variar la frecuencia eléctrica y así modificar la velocidad de rotación de las bombas. Se hablará más en detalle de este sistema en un apartado próximo.

Las bombas son de tipo electrobomba centrífuga, fabricada por *Pedrollo*, modelo F100-160C. Están colocadas en paralelo y tienen un caudal máximo de 300 m<sup>3</sup>/h cada una, permitiendo un caudal máximo total del sistema de 600 m<sup>3</sup>/h. Cada una de las bombas tiene una potencia máxima de 15 kW y son alimentadas por una corriente trifásica de 400 V.

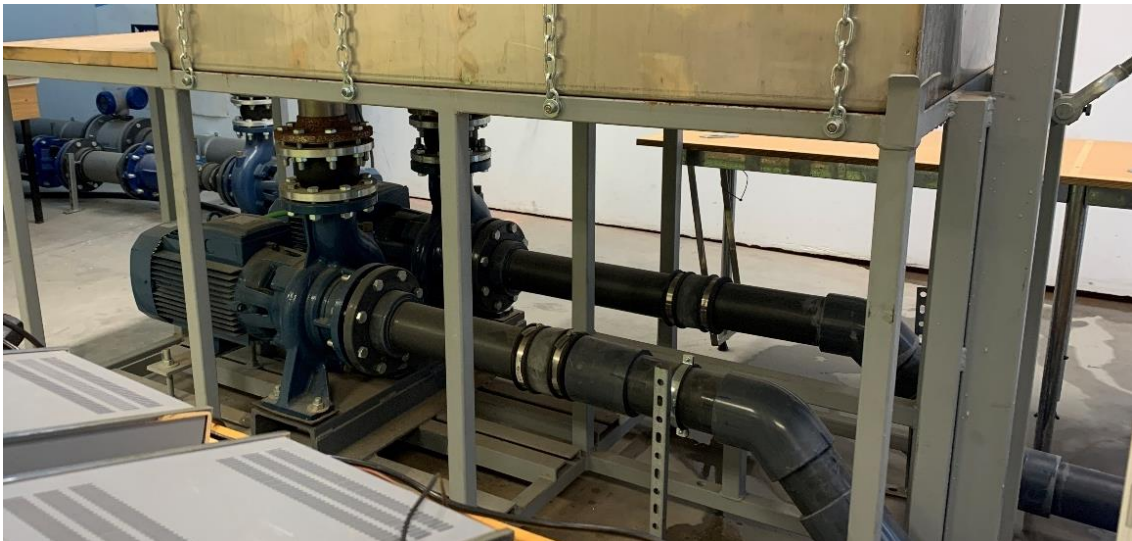


ILUSTRACIÓN 42. EQUIPO DE BOMBEO

**C. VARIADORES DE POTENCIA**

Para regular el caudal que circula por el canal se modifica la frecuencia de la corriente eléctrica que alimenta las bombas, permitiendo regular la velocidad de rotación de éstas y así decidir la cantidad de agua que sube al tanque de tranquilización.

Este proceso se realiza mediante el uso de un variador tipo OMRON 3G3RX-E que nos permite controlar los parámetros por pantalla o software y además nos indica la potencia total absorbida por el sistema, lo cual es muy útil a la hora de determinar el caudal según curva del fabricante.

En la tabla siguiente se presenta la relación entre los distintos valores de frecuencia eléctrica y caudal.

<i>Frecuencia eléctrica (Hz)</i>	<i>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</i>
10	0,022
15	0,036
20	0,047
25	0,055
30	0,064
35	0,071
40	0,076
45	0,081
50	0,085



ILUSTRACIÓN 43. VARADORES DE POTENCIA

d. TANQUE DE TRANQUILIZACIÓN

Para suministrar caudal al canal y reducir al mínimo las turbulencias con las que el agua sale del equipo de bombeo, se ha colocado un tanque de tranquilización entre las propias bombas y el canal de pruebas. En su interior existen una serie de deflectores metálicos que rompen el flujo de agua y reducen considerablemente estas turbulencias.

La entrada de agua, análogo al tanque de aspiración, se realiza a través de dos orificios de

110 mm de diámetro en la parte inferior del tanque. En la tabla de la derecha se pueden ver las dimensiones del tanque. Las paredes están fabricadas en acero inoxidable AISI 304 de 3 mm de espesor.

Dimensiones del tanque de tranquilización

Alto (m)	1
Ancho (m)	1
Largo (m)	1,5
Capacidad (m <sup>3</sup> )	1,5



ILUSTRACIÓN 44. TANQUE DE TRANQUILIZACIÓN

e. CANAL DE ENSAYOS

El elemento más fundamental para la realización de los experimentos es el canal de ensayos. En él se colocará la turbina y se hará fluir el agua a través de ella.

Las paredes y la solera del canal están fabricados en cristal laminado de 5+5 mm de espesor, lo que permite minimizar el rozamiento y permitir la grabación en vídeo de los experimentos. Los cristales están acoplados a una estructura metálica en celosía mediante el uso de resina Epoxi.

Dimensiones del canal de ensayos

<i>Alto (m)</i>	0,5
<i>Ancho (m)</i>	0,3
<i>Largo (m)</i>	3,5

Entre el tanque de tranquilización y el canal se ha ubicado un sistema de rótula con tornillo que permite regular la inclinación del canal, pudiendo ésta ser variada entre una pendiente totalmente horizontal del 0% hasta una del 10%. En la tabla de la derecha se pueden consultar las medidas del canal.



ILUSTRACIÓN 45. CANAL DE ENSAYOS

#### f. COMPUERTA DE CONTROL

A la salida del canal se ha colocado una compuerta de control de caudal, accionable mediante un mecanismo de tajadera. Gracias a una serie de juntas plásticas, el cierre del canal es hermético.

La compuerta está fabricada en acero inoxidable AISI 304 de 3 mm de espesor y con unas dimensiones iguales que el propio canal: 0,5 m de alto y 0,3 m de ancho.



ILUSTRACIÓN 46. COMPUERTA DE CONTROL

#### g. SISTEMA PARA LA COLOCACIÓN DE LAS TURBINAS

Para la colocación tanto de la turbina como del sistema de medición en el canal se ha diseñado una caja de madera y metacrilato. Ésta dispone de un rodamiento radial en su parte inferior al cual se le acopla el eje del rotor mientras que en la parte superior del sistema se coloca el freno eléctrico y el medidor de par. En la imagen de la derecha se puede ver todo el sistema.

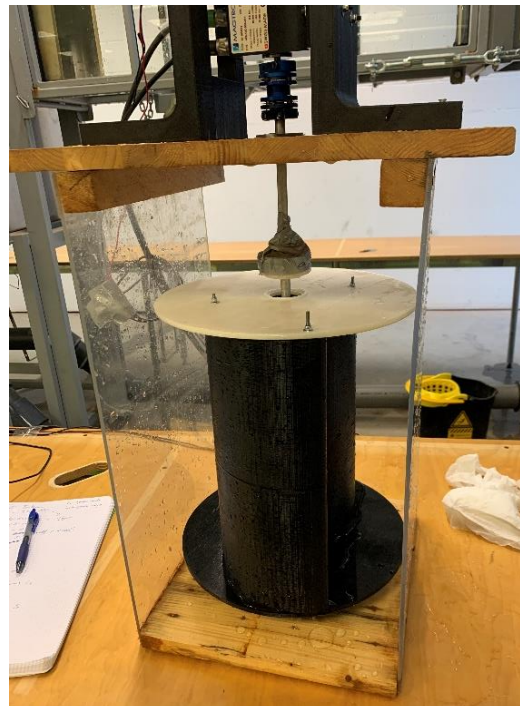


ILUSTRACIÓN 47. SISTEMA PARA LA COLOCACIÓN DE LA TURBINA

**h. ELEMENTOS AUXILIARES**

El sistema está unido mediante distintos elementos auxiliares que permiten el ensamblaje de todo el túnel hidrodinámico. Se presentan en una tabla a continuación.

<i>Elemento</i>	<i>Características</i>
<i>Tubería</i>	<i>Tubos PVC de presión de 110 mm de diámetro.</i>
<i>Acoples</i>	<i>Bridas de PVC-U para la conexión de los tubos a la bomba de 110 mm de diámetro.</i>
<i>Llaves y válvulas</i>	<i>Dos válvulas mariposa de 0,5" conectadas a un grifo para evacuar los tanques.</i>
<i>Manguitos anti-vibración</i>	<i>Colocados en la impulsión de la bomba para minimizar vibraciones.</i>

**6.2.3 SISTEMA PARA LA CAPTACIÓN DE DATOS**

Para realizar la captación de los datos provenientes de la turbina se ha usado un sistema compuesto fundamentalmente por tres elementos:

- a. *Medidor de par*
- b. *Freno eléctrico*
- c. *Software de captación de datos*

**a. MEDIDOR DE PAR**

A fin de caracterizar la etapa de potencia de la turbina se ha hecho uso de un medidor de par *MAGTROL TS 103* con un par nominal de 0,5 Nm y un par máximo de 1 Nm. Este elemento se conecta el medidor al ordenador por USB y, gracias al software de medición, obtendremos los valores que se presentan en la tabla inferior.

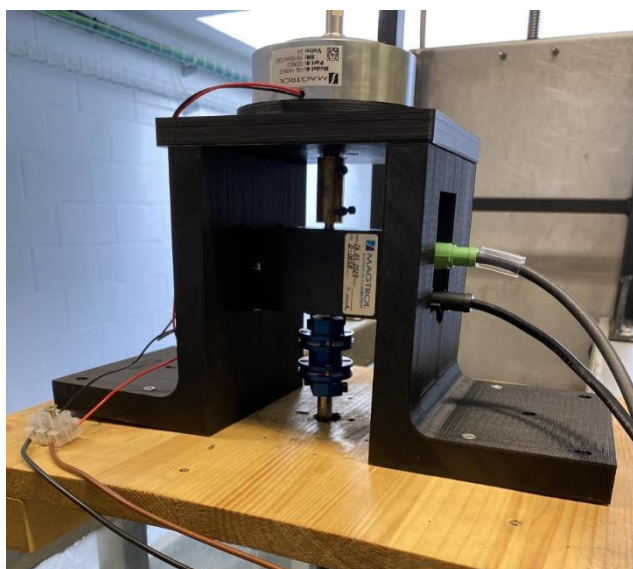


ILUSTRACIÓN 48. MEDIDOR DE PAR Y FRENO

<i>Magnitud</i>	<i>Unidad</i>
<i>Ángulo de giro</i>	$^{\circ}$
<i>Par</i>	$Nm$
<i>Velocidad angular</i>	$rpm$
<i>Potencia mecánica</i>	$W$
<i>Tiempo</i>	$s$

**b. FRENO ELÉCTRICO**

Para caracterizar la etapa de potencia del rotor es necesario aplicarle un par resistivo. Para ello, se ha hecho uso de un freno eléctrico colocado sobre el medidor de par. Mediante una fuente de corriente se varía la intensidad que pasa por el freno, lo que a su vez modifica el par resistivo que ejerce sobre el rotor. Así, se obtiene una potencia mecánica para cada par de frenado.



ILUSTRACIÓN 49. FUENTES DE ALIMENTACIÓN

### C. SOFTWARE DE CAPTACIÓN DE DATOS

Mediante el software proporcionado por el fabricante del medidor de par (*MAGTROL TORQUE 10*) se captan y se almacenan todos los datos provenientes del mismo. Como se puede ver en la imagen inferior, este software permite la visualización gráfica en tiempo real de los datos, permitiendo comprobar al mismo tiempo que se realiza el experimento que todo está funcionando con normalidad.

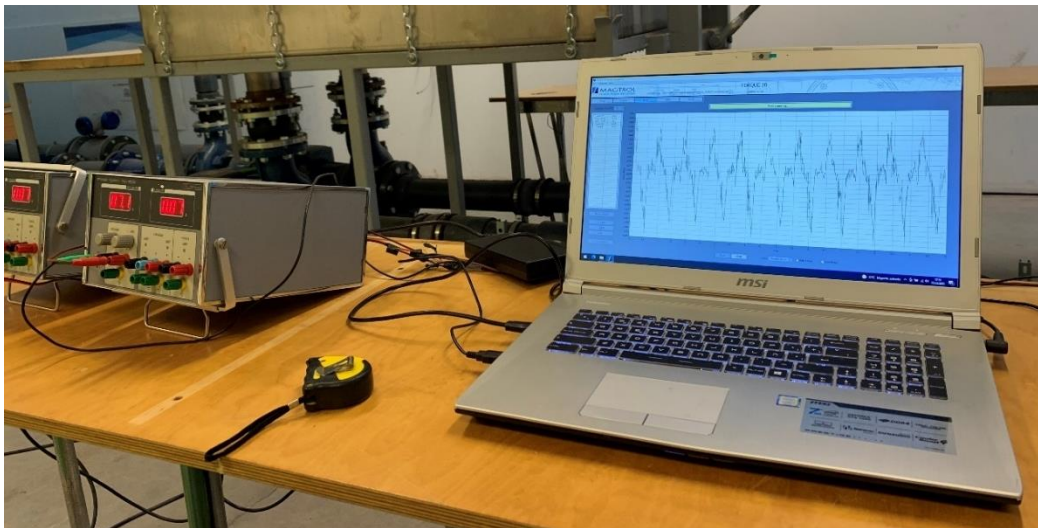
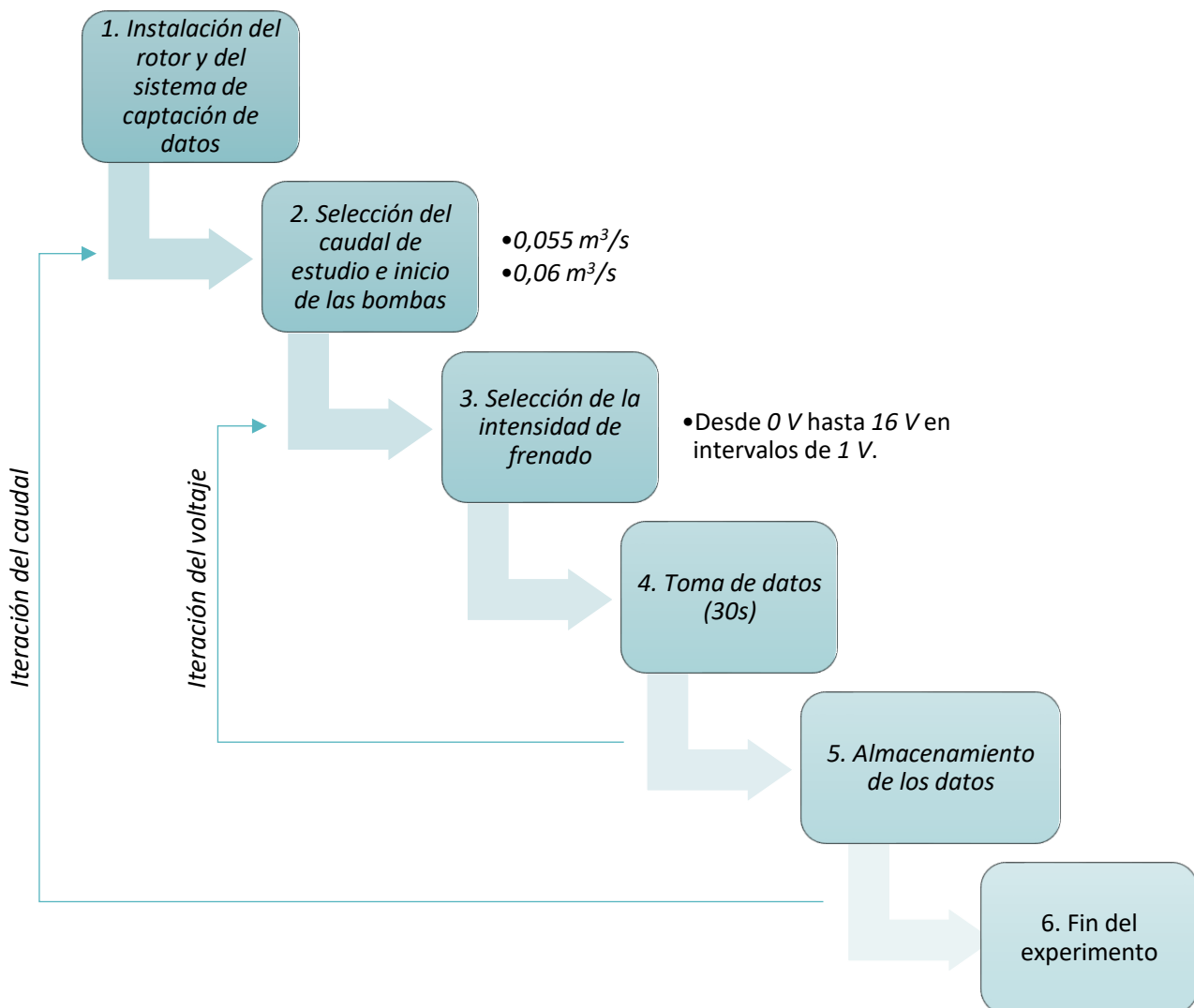


ILUSTRACIÓN 50. SOFTWARE TORQUE 10



### 6.3 METODOLOGÍA

En el siguiente diagrama de flujo se presenta un resumen de los pasos seguidos para la obtención experimental de los datos de caracterización de la turbina: desde la colocación del rotor en el canal hasta la parada de las bombas y el fin del experimento:



## 6.4 RESULTADOS

### 6.4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos a la hora de caracterizar la etapa de potencia de la turbina para cada uno de los dos caudales estudiados. En primer lugar, se ve puede ver una tabla con los valores velocidad angular, potencia, *Tip Speed Ratio* y coeficiente de potencia para cada uno de los voltajes con los que se ha alimentado el freno. Se han seleccionado esos caudales debido a que el más bajo ( $0,055 \text{ m}^3/\text{s}$ ) corresponde con el caudal a partir del cual empieza a rotar la turbina mientras que el mayor ( $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ ) es el más alto simulado en condiciones de seguridad.

También se intentó realizar el experimento con un caudal superior, de  $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sin embargo, durante la realización de éste se produjo la rotura de la unión de la turbina con el eje de rotación, probablemente debido a la insuficiente resistencia del filamento con el que está construida la turbina y al gran efecto de bloqueo que provoca el propio rotor ante un caudal tan elevado de agua. En la figura de la derecha se puede ver la turbina tras el incidente. Por

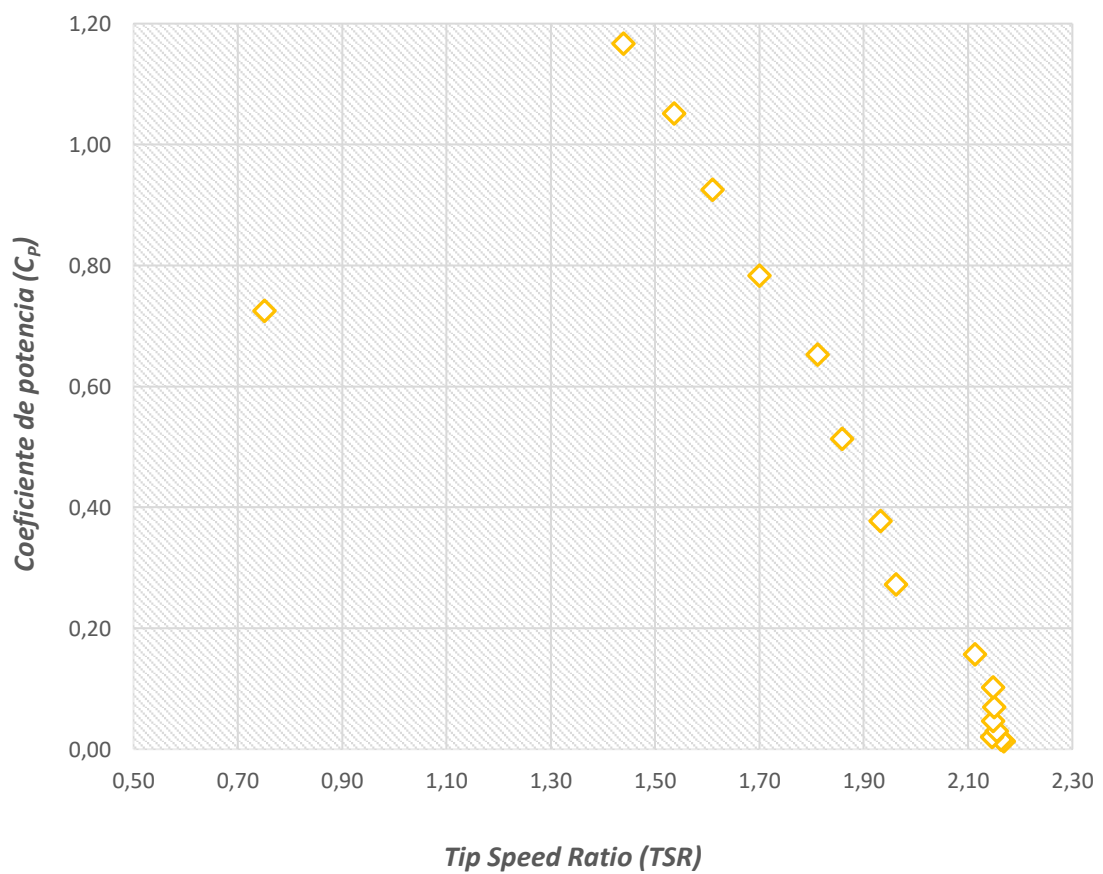
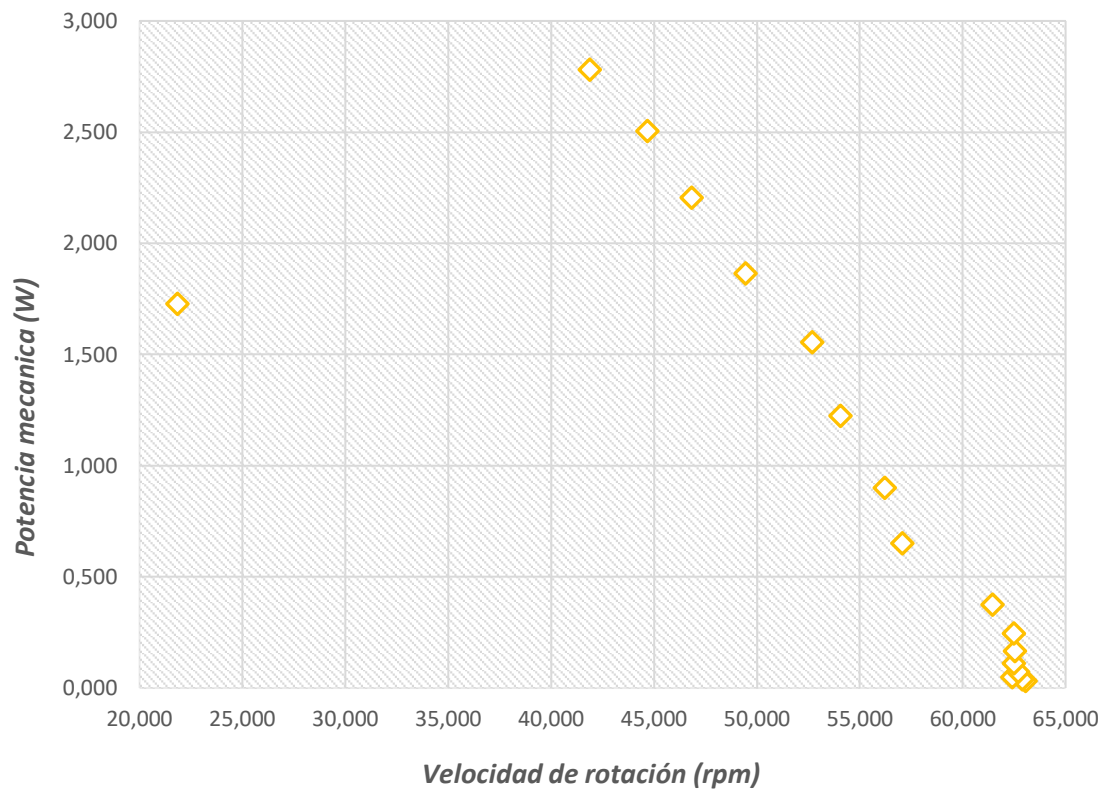


ILUSTRACIÓN 51. TURBINA ROTA

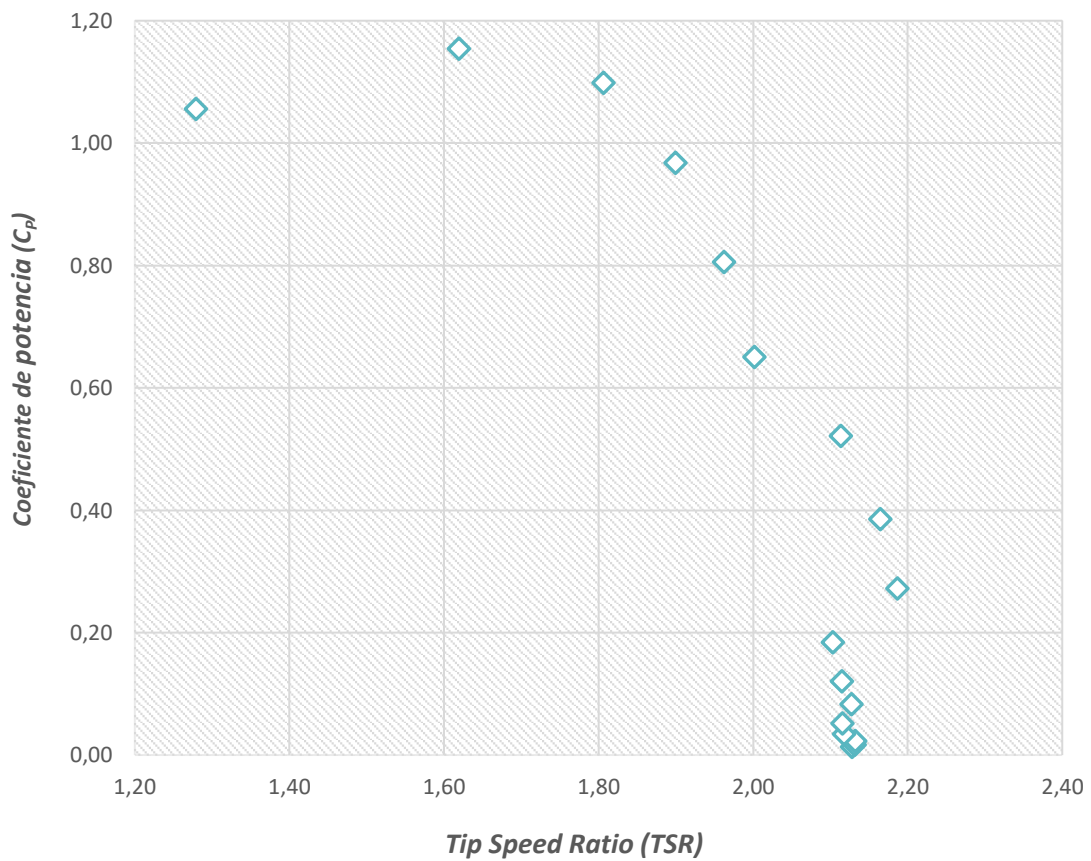
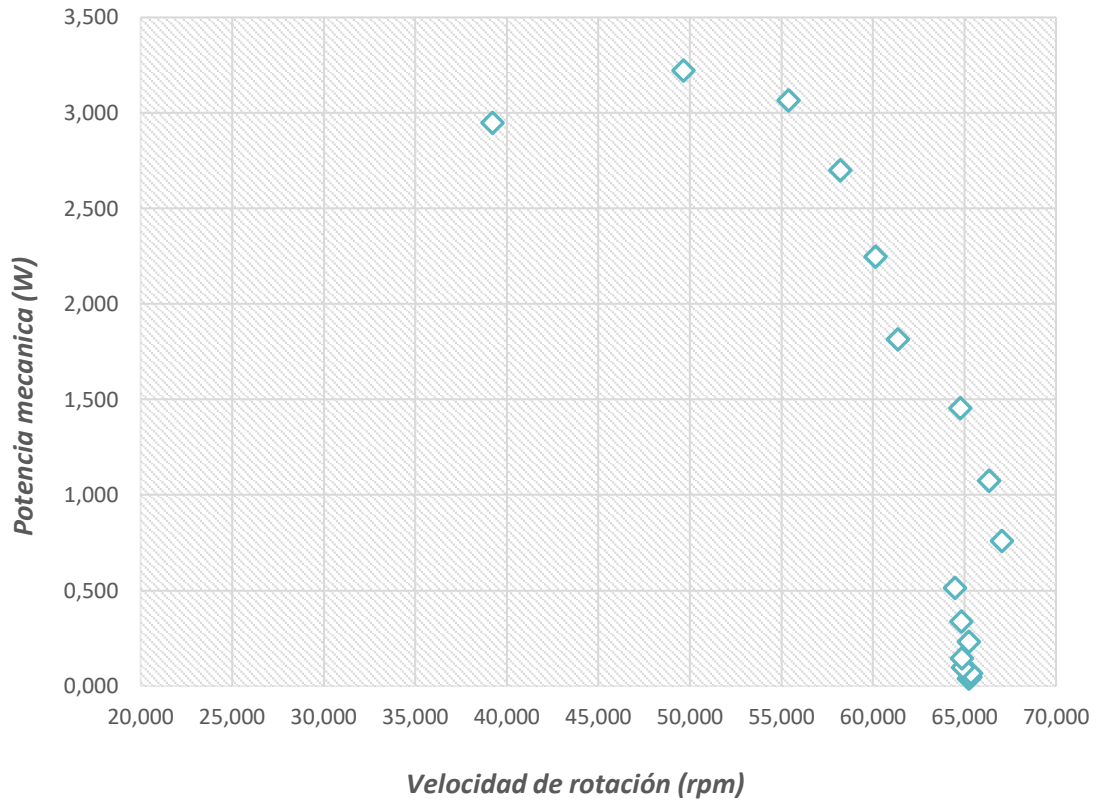
ello, para este caudal no fue posible la realización de la caracterización de la etapa de potencia de la turbina.

En las dos gráficas siguientes se representa tanto la potencia mecánica frente a la velocidad angular como el  $C_p$  frente al  $TSR$ .

### 6.4.2 CAUDAL DE 0,055 M<sup>3</sup>/S

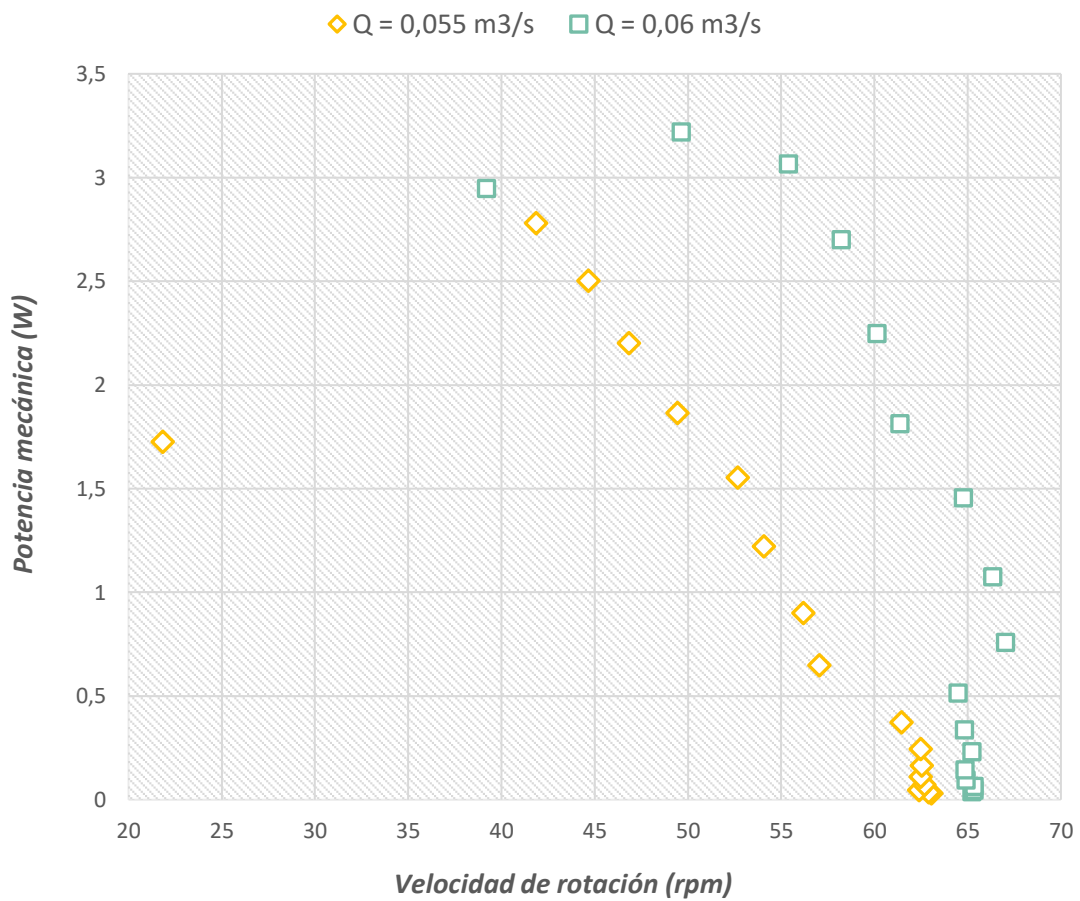


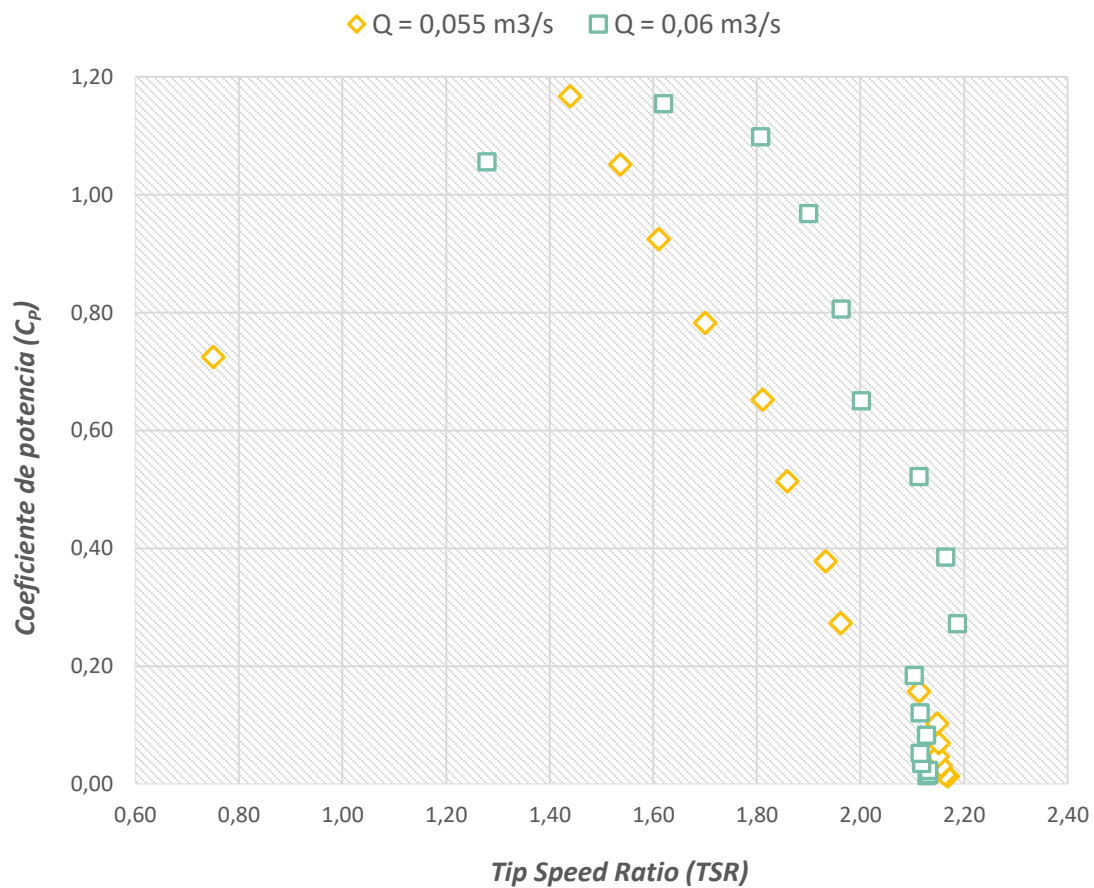
### 6.4.3 CAUDAL DE 0,06 M3/s



## 6.5 DISCUSIÓN

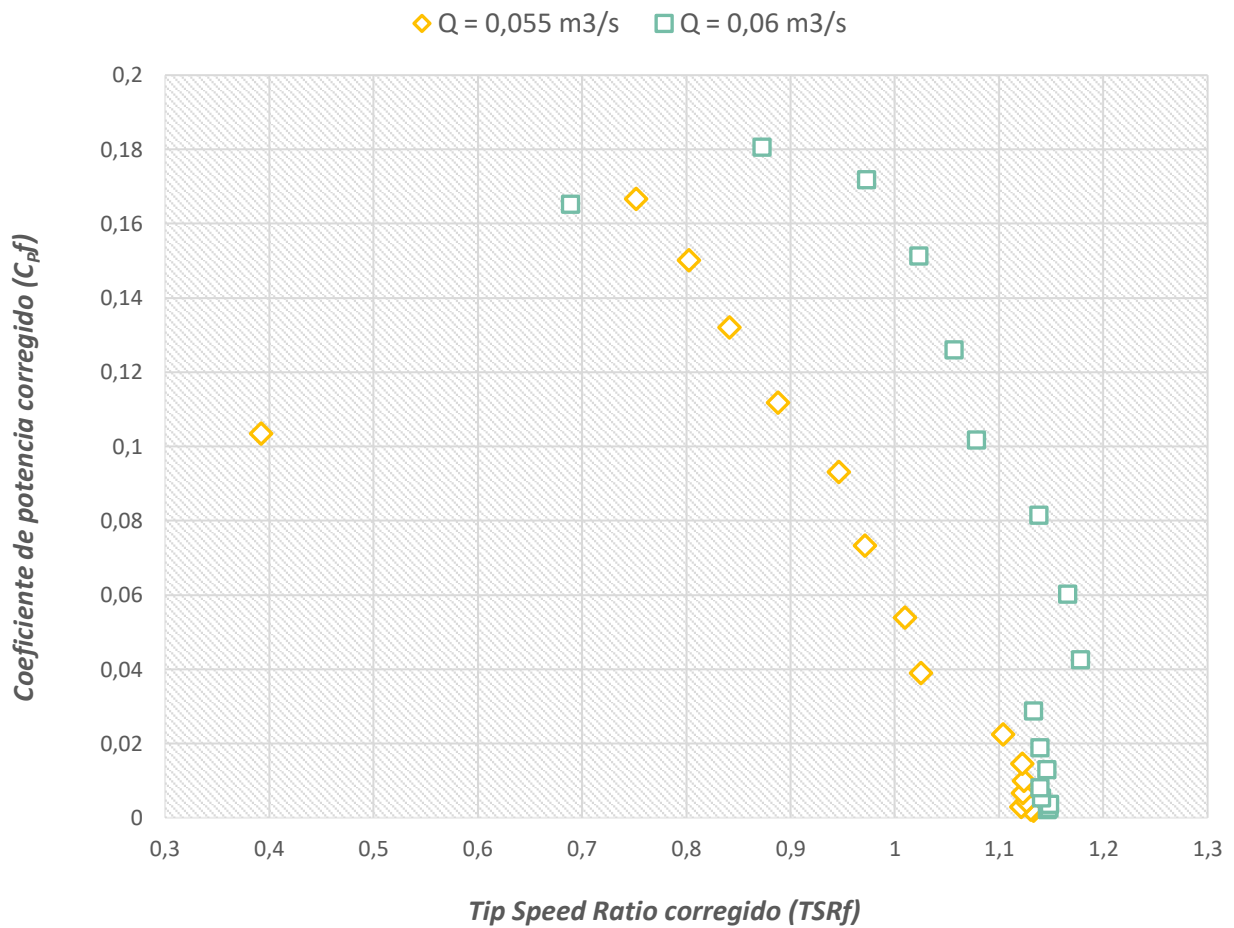
En las gráficas siguientes se representan tanto las curvas de potencia frente a velocidad de giro como las de coeficiente de potencia frente a *Tip Speed Ratio* para ambos caudales, a continuación, se discuten los resultados y se propone una corrección para el fenómeno de bloqueo.





Como se puede apreciar en las figuras anteriores, se alcanza un  $C_p$  de alrededor de 1,20 para ambos caudales. Esto indica que la turbina ha trabajado en condiciones de máxima eficiencia puesto que un incremento de la velocidad del agua no ha supuesto una mejora de su  $C_p$ . Además, observando los valores del  $TSR$  se puede observar que en condiciones de bloqueo la turbina alcanza su  $C_p$  máximo a un  $TSR$  en torno a 1,5. Estos valores son muy superiores a la unidad, lo que podría considerarse como que la turbina no esté trabajando en condiciones de arrastre. Sin embargo, si corregimos el fenómeno de bloqueo, aplicando las expresiones contenidas en el apartado [Corrección al fenómeno de bloqueo](#) (en concreto, Werle), los valores de  $C_p$  y  $TSR$  disminuyen considerablemente.

En la gráfica siguiente se muestran los resultados del experimento con la corrección de Werle.



Tras la aplicación de la corrección del fenómeno de bloqueo, se observa como los valores máximos de  $C_p$  se encuentran ahora por debajo del límite de Betz, lo que tiene coherencia física. Además, ahora, esos valores máximos de  $C_p$  se alcanzan para valores de  $TSR$  en torno a la unidad, lo que se corresponde con los valores a los que teóricamente trabajan las turbinas de arrastre. Así, la caracterización del rotor Savonius de la presente investigación, arroja como resultados que la turbina, efectivamente, ha trabajado a arrastre durante los ensayos.

---

## 7. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo la caracterización de la etapa de potencia de una turbina hidrocíntrica de eje vertical tipo Savonius en condiciones de baja velocidad de corriente. Todo ello ha sido llevado a cabo en el interior de un túnel hidrodinámico sito en el laboratorio del Área de Ingeniería Hidráulica en la Escuela Politécnica de Mieres.

En primer lugar, se ha hecho un estudio de la situación energética mundial, con especial énfasis en el mercado eléctrico español y en la posición que las energías renovables ocupan en él. Se observa la gran dependencia de los combustibles fósiles que aún existe en la mayoría de los mercados energéticos mundiales.

A continuación, se ha introducido y analizado a fondo la energía hidroeléctrica: comentándose su pasado, presente y futuro tanto en un contexto mundial como en uno nacional. Se aprecia que, a pesar del peso que ha tenido esta fuente de energía en el desarrollo humano, hoy en día se ve una tendencia claramente descendente en la inversión en hidráulica con respecto a las energías renovables más modernas.

También se ha realizado un estudio teórico del funcionamiento de las turbinas hidráulicas y, más en concreto, de las hidrocíntricas. En concreto, se ha descrito en detalle los conceptos fundamentales necesarios para la correcta caracterización de la turbina a estudiar.

El estudio de la turbina se ha llevado a cabo en el túnel hidrodinámico del Área de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Oviedo, en la Escuela Politécnica de Mieres. Haciendo uso de un freno eléctrico, un medidor de par y de su software asociado se han tomado las medidas de los parámetros necesarios para la caracterización de la turbina para dos caudales distintos. En concreto, se han tomado datos de par mecánico, velocidad de rotación y potencia mecánica.



Para terminar, se han tratado los datos obtenidos y se han analizado los resultados, determinándose valores del coeficiente de potencia y del *Tip Speed Ratio* para ambos caudales y obteniendo las gráficas características de la etapa de potencia de la turbina.

Teniendo en cuenta la teoría de flujo en canales confinados, se ha entrado a valorar la influencia que el fenómeno de bloqueo tuvo en los ensayos en el túnel hidrodinámico. En concreto, se ha comprobado que, mediante el uso de la fórmula de Werle de corrección del bloqueo, se obtiene unos valores de coeficiente de potencia y de *TSR* físicamente coherentes. Además, y a falta de un análisis en profundidad, se puede considerar que la turbina Savonius ha funcionado a arrastre al ser sus valores del *TSR* inferiores a la unidad después de la corrección.

---

## 8. *TRABAJOS FUTUROS*

A partir de los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Grado sería posible realizar un modelo numérico que permita el estudio en mayor profundidad de la influencia de la geometría del canal y de la turbina en la caracterización de la etapa de potencia en turbinas hidrocinéticas.

Sería también posible estudiar con más detalle el impacto que el fenómeno de bloqueo tiene sobre el rendimiento y la viabilidad de proyectos hidráulicos en condiciones de baja velocidad de corriente y flujo confinado.

---

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- 3DPrinting.com. (s.f.). Obtenido de <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- Afework, B., Hanania, J., Stenhouse, K., & Donev, J. (2018).
- Ansys. (s.f.). Obtenido de <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Arstechnica. (2017). Obtenido de <https://arstechnica.com/science/2017/04/uk-first-coal-free-power-day/>
- Britannica. (s.f.). Obtenido de <https://www.britannica.com/science/hydroelectric-power>
- Britannica. (2022). Obtenido de <https://www.britannica.com/topic/Three-Gorges-Dam>
- Cardona-Mancilla, C., Río, J. S., Chica-Arrieta, E., & Hincapié-Zuluaga, D. (2018). Turbinas hidrocínicas de eje horizontal: una revisión de la literatura.
- Dewan, A., Gautan, A., & Goyal, R. (2021). Savonius wind turbines: A review of recent advances in design and performance enhancements.
- Dornier. (s.f.). <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/358-dornier-darrieus-savonius-5-5-kw>.
- Earth.org. (2021). Obtenido de <https://earth.org/the-future-of-hydroelectric-power/>
- RawMaterials. (2021). Obtenido de <https://eitrawmaterials.eu/circular-sprint-learn-to-implement-circular-design-with-3d-printing/>
- ESSS. (s.f.). Obtenido de <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- Free Flow Power Corporation. (s.f.). Obtenido de <https://ensia.com/features/new-spin-on-hydropower/3/>
- French River Land. (s.f.). Obtenido de [https://www.frenchriverland.com/1852\\_fourneyron.htm](https://www.frenchriverland.com/1852_fourneyron.htm)

General Electric. (2020). Obtenido de <https://www.ge.com/news/reports/heavy-metal-building-huge-hydropower-plant-involves-steady-hands-and-boatload-finesse>

Gomez, D., & Posada, J. (2009). Obtenido de [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4462/DanielGomez\\_JorgePosada\\_04\\_marcoTeorico\\_2009.pdf](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4462/DanielGomez_JorgePosada_04_marcoTeorico_2009.pdf)

GreenGeeks. (s.f.). Obtenido de <https://www.greengeeks.com/blog/hydroelectric-energy/>

Houlsby, G., Draper, S., & Oldfield, M. (2008). Application of Linear Momentum Actuator Disc Theory to Open Channel Flow.

IEA. (s.f.). Obtenido de <https://www.hydropower.org/iha/discover-history-of-hydropower>

IEA. (2022). Obtenido de <https://www.iea.org/news/renewable-power-is-set-to-break-another-global-record-in-2022-despite-headwinds-from-higher-costs-and-supply-chain-bottlenecks>

IHA. (s.f.). Obtenido de <https://www.hydropower.org/country-profiles/china>

IHA. (s.f.). Obtenido de <https://www.hydropower.org/blog/blog-hydropower-growth-and-development-through-the-decades>

Just Energy. (s.f.). *Go With The Flow: An Introduction to Hydro Energy*. Obtenido de <https://justenergy.com/blog/go-with-the-flow-an-introduction-to-hydro-energy/>

Linquip. (2021). Obtenido de <https://www.linquip.com/blog/wp-content/uploads/2021/04/featured-image-6.jpg>

LuvSide. (s.f.). Obtenido de <https://www.luvside.de/en/3-0-savonius-wind-turbine/>

Marín, C. E., & Marín, R. G. (2010). AGUA Y ENERGÍA: PRODUCCIÓN HIDROELÉCTRICA EN ESPAÑA.

Mechanical E-Notes. (s.f.). Obtenido de <https://mechanicalnotes.com/hydraulic-turbine/>

National Geographic. (s.f.). Obtenido de <https://education.nationalgeographic.org/resource/hydroelectric-energy>

National Renewable Energy Laboratory. (s.f.). *Hydropower Basics*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/research/hydropower.html>

Nature. (2017). Obtenido de <https://www.nature.com/articles/d41586-017-07506-z>

New Atlas. (s.f.). Obtenido de <https://assets.newatlas.com>

Office of energy efficiency and renewable energy. (s.f.). Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/water/history-hydropower>

Office of energy efficiency and renewable energy. (s.f.). Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines>

OpenLearn. (s.f.). Obtenido de <https://www.open.edu/openlearn/mod/oucontent/view.php?id=73762&section=8>

ORPC. (s.f.). Obtenido de <http://www.orpc.co/>

Our World in Data. (s.f.). Obtenido de <https://ourworldindata.org/energy-mix?country=#energy-mix-what-sources-do-we-get-our-energy-from>

Our World in Data. (2020). Obtenido de <https://ourworldindata.org/renewable-energy>

Our World in Data. (2021). Obtenido de <https://ourworldindata.org/renewable-energy>

Pixabay. (s.f.). Obtenido de <https://pixabay.com/es/photos/molino-rueda-de-agua-molino-de-agua-2078376/>

PNAS. (2018). Obtenido de <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1809426115>

Power Technology. (s.f.). Obtenido de <https://www.power-technology.com/analysis/history-of-nuclear-power/>

Público. (2017). Obtenido de <https://www.publico.es/economia/tres-grandes-electricas-ganan-4300-millones-septiembre.html>

Red Eléctrica de España. (2022). Obtenido de <https://www.eltiempo.es/noticias/energia-renovable-espana-comunidades-autonomas>

Restrepo, T. Y. (2020). Evaluación del coeficiente de potencia de una turbina tipo Savonius mediante dos programas de simulación numérica.

REUK.co.uk. (s.f.). Obtenido de <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/>

Roams. (2022). Obtenido de <https://energia.roams.es/energia-renovable/energia-hidraulica/espana/>

ScienceDirect. (2014). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/savonius-wind-turbine>

ScienceDirect. (2018). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydraulic-turbines>

Simec Atlantis Energy. (s.f.). Obtenido de <https://simecatlantis.com>

Simscale. (s.f.). Obtenido de <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>

SIMSCALE. (s.f.). Obtenido de <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>

Solar Energy. (s.f.). Obtenido de <https://solar-energy.technology/renewable-energy/hydropower/advantages-disadvantages>

Statista. (s.f.). Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/993747/porcentaje-de-la-produccion-de-energia-electrica-por-fuentes-energeticas-en-espana/>

Statista. (2021). Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/993747/porcentaje-de-la-produccion-de-energia-electrica-por-fuentes-energeticas-en-espana/>

Statkraft. (s.f.). Obtenido de [https://www.statkraft.com/globalassets/0/.com/about-statkraft/where-we-operate/sweden/sweden\\_bjorkhojden\\_wind\\_farm\\_1\\_1000x800.jpg](https://www.statkraft.com/globalassets/0/.com/about-statkraft/where-we-operate/sweden/sweden_bjorkhojden_wind_farm_1_1000x800.jpg)

trvst. (2022). Obtenido de <https://www.trvst.world/renewable-energy/the-history-of-hydroelectric-energy/>

U.S. Department of the Interior. (2005). *Hydroelectric Power*.

Union of Concerned Scientists. (2006). Obtenido de <https://www.ucsusa.org/resources/short-history-energy>

Valdés, R. E. (2019). Microturbina para aprovechamiento eléctrico en corrientes de baja velocidad.

Vermaak, H. J., Kusakana, K., & Koko, S. P. (2013). Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature.

Wall Street Journal. (s.f.). Obtenido de <https://www.wsj.com/story/the-roots-of-renewable-energy-7993f651>

Wenehenubun, F., Saputra, A., & Sutanto, H. (2015). An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades.

WikiWand. (s.f.). Obtenido de [https://www.wikiwand.com/simple/Water\\_turbine](https://www.wikiwand.com/simple/Water_turbine)

Windside. (s.f.). Obtenido de <https://www.archiexpo.com/prod/windside/product-88530-959470.html>

