

Marcos Sánchez Serrano

Aprovechamiento Energético de Extractores Eólicos

**Trabajo de Fin de Máster
dirigido por el Dr. Jordi Pallarès Curto**

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona
Septiembre 2016**

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto trata sobre la determinación de la eficiencia energética de un extractor eólico compuesto por una turbina mecánica la cual se instala típicamente en las azoteas de edificios. Su principal función es la de mejorar el tiro en chimeneas y la ventilación y renovación del aire en el interior de los edificios.

Se propone determinar la capacidad que posee dicho extractor para convertir la energía eólica en mecánica con la finalidad de evaluar la posibilidad de convertir dicho extractor en un generador eólico de electricidad. Debido a esto, el proyecto presenta un enfoque claramente investigador.

Para ello, se realiza diferentes ensayos utilizando túnel de viento con la finalidad de obtener las curvas de potencia que rigen el funcionamiento del extractor en función de los coeficientes de potencia (CP) obtenidos frente el Tip Speed Ratio (TSR). Para estos ensayos ha sido necesario el uso de diferente tipo de instrumentación como células de carga y tubo pitot, juntamente con la configuración del equipo para adquisición de datos y muestreo de señales.

Posteriormente, se realiza una modificación del extractor convencional mediante la instalación de dos perfiles de ala tipo NACA-0014, con la finalidad de mejorar el rendimiento energético y donde se estudia la estela del flujo que deja detrás de sí el extractor. En este punto, se trata de visualizar las corrientes de flujo mediante el empleo de la metodología Tuft-Grid, juntamente con la captación de imágenes a alta velocidad y el post-procesado de estas.

Finalmente, se analiza los efectos que provoca la succión que realiza el extractor en los resultados del rendimiento energético donde, a posteriori, se establecen las conclusiones sobre la viabilidad del proyecto.

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

TÍTULO DEL PROYECTO:

"Aprovechamiento Energético de Extractores Eólicos"

PROMOTOR DEL PROYECTO:

Nombre: Hotel NH Ciutat de Reus

Dirección: Av. Marià Fortuny, 85 43203 Reus (Tarragona)

Teléfono de contacto: (+34) 977 345 353

Correo electrónico: nhciutatdereus@nh-hotels.com

AUTOR DEL PROYECTO:

Nombre del autor: Marcos Sánchez-Serrano

NIF: 47829018-N

Estudios en curso: Máster en Ingeniería Industrial

Dirección: C/ Maragall 11, 3º 3ª, esc B, 43560 La Sénia (Tarragona)

Teléfono de contacto: (+34) 617 564 495

Correo electrónico: marcos.sanchez.serrano@gmail.com

Índice General

1	Objeto del proyecto	1
1.1	Promotor del proyecto	1
1.2	Equipo redactor.....	1
1.3	Resumen descriptivo del equipo a analizar.....	1
2	Problema de Investigación.....	2
2.1	Planteamiento del problema	2
2.2	Objetivos de la investigación	2
2.2.1	<i>Objetivos generales</i>	2
2.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
2.3	Justificación del estudio	3
2.4	Limitaciones y alcance de la investigación	4
3	Condicionantes del proyecto	4
3.1	Condicionantes impuestos por el promotor	4
3.2	Condicionantes impuestos por legislación y normativa aplicable.....	5
3.3	Condicionantes del entorno físico y del extractor.....	6
4	Marco Teórico.....	7
4.1	Definición de términos	7
4.2	Recurso eólico.....	8
4.2.1	<i>Aprovechamiento del viento</i>	8
4.2.2	<i>Velocidad del viento</i>	8
4.3	Bases teóricas.....	9
4.3.1	<i>Caracterización energética del viento</i>	9
4.3.2	<i>Potencia eólica disponible</i>	11
4.3.3	<i>Teoría ideal de los Aerogeneradores. Límite de Betz</i>	13
4.3.4	<i>Fuerzas sobre cuerpos sustentadores. Perfil de Ala</i>	17
4.3.5	<i>Curvas de potencia</i>	22

4.4	Principales variables	23
4.4.1	<i>Velocidad relativa TSR (λ):</i>	23
4.4.2	<i>Coefficiente de Potencia (C_p):</i>	23
4.4.3	<i>Área frontal barrida:</i>	24
5	Estudio Eólico de la zona	25
6	Metodología de análisis	29
6.1	Técnica empleada en el estudio.....	29
6.2	Instrumentos utilizados para adquisición de datos.....	33
6.2.1	<i>Células de carga Burster 8523</i>	33
6.2.2	<i>Amplificador multicanal Burster 9235</i>	34
6.2.3	<i>Transductor de presión SETRA 239</i>	34
6.2.4	<i>DAQ National Instruments USB-6009</i>	35
6.2.5	<i>Túnel de viento 4-Winds OJWT</i>	36
6.3	Software empleado	38
6.4	Elaboración de curvas de potencia	39
6.5	Plan de recolección y procesado de datos.....	42
7	Curvas de potencia del extractor comercial	43
7.1	Curva de potencia a 9,60 m/s (Túnel 15Hz).....	44
7.2	Curva de potencia a 10,40 m/s (Túnel 16Hz).....	45
7.3	Curva de potencia a 11 m/s (Túnel 17Hz).....	46
7.4	Curva de potencia a 11,80 m/s (Túnel 18Hz).....	47
7.5	Curva de potencia a 13 m/s (Túnel 19Hz).....	48
7.6	Conjunto curvas de potencia experimentales extractor comercial.....	50
7.7	Conclusiones eficiencia energética extractor comercial.....	51

8	Alternativas de modificación	53
8.1	Justificación de la modificación seleccionada.....	53
9	Análisis del extractor modificado	55
9.1	Curva de potencia a 9,60 m/s (Túnel 15Hz).....	55
9.2	Curva de potencia a 10,20 m/s (Túnel 16Hz).....	57
9.3	Curva de potencia a 11 m/s (Túnel 17Hz).....	59
9.4	Curva de potencia a 11,80 m/s (Túnel 18Hz).....	61
9.5	Curva de potencia a 13 m/s (Túnel 19Hz).....	63
9.6	Conjunto curvas de potencia experimentales extractor modificado.....	65
9.7	Comparativa entre extractor comercial y modificado.....	66
10	Análisis de la estela del flujo del extractor modificado	68
10.1	Análisis de la estela del flujo de aire.....	68
10.2	Metodología del ensayo mediante Tuft Grid	70
10.2.1	<i>Descripción técnica del Tuft Grid.....</i>	<i>70</i>
10.2.2	<i>Adquisición de imágenes.....</i>	<i>71</i>
10.2.3	<i>Procesado de imágenes mediante MatLAB.....</i>	<i>73</i>
10.3	Script elaborado.....	75
10.4	Resultados del ensayo Tuft Grid y procesado imágenes	76
10.5	Conclusiones análisis estela del flujo	82
11	Análisis del efecto extractor	83
11.1	Curva de potencia a 9,60 m/s (Túnel 15Hz).....	84
11.2	Curva de potencia a 10,40 m/s (Túnel 16Hz).....	86
11.3	Curva de potencia a 11,00 m/s (Túnel 17Hz).....	88
11.4	Curva de potencia a 11,80 m/s (Túnel 18Hz).....	90
11.5	Curva de potencia a 13,00 m/s (Túnel 19Hz).....	92
11.6	Conjunto curvas de potencia sin extracción	94
11.7	Comparativa entre los diferentes ensayos.....	95
12	Ingeniería básica de la instalación de generación.....	97

12.1	Potencial eléctrico de generación	97
13	Conclusiones del proyecto	100
14	Propuestas de mejora en caso de futuros proyectos.....	101
15	Referencias bibliográficas	102
Anexo A: Errores en las curvas de potencia experimentales		103

Índice de Figuras

Figura 1.1	Dibujo esquemático del extractor comercial a estudiar	1
Figura 2.1	Perspectiva de la edificación Hotel NH Ciutat de Reus	2
Figura 4.1	Histograma de velocidad de viento y probabilidad	10
Figura 4.2	Análisis del flujo en un aerogenerador mediante la analogía del disco en un tubo de corriente	13
Figura 4.3	Coeficientes de potencia típicos para diferentes tipologías de aerogeneradores	16
Figura 4.4	Comparación del flujo alrededor de una placa plana	18
Figura 4.5	Explicación de la generación de la sustentación	19
Figura 4.6	Definiciones para una superficie sustentadora	20
Figura 4.7	Separación de la corriente en la superficie superior de un perfil sustentador en pérdida	21
Figura 4.8	Extractor proporcionado por el promotor	24
Figura 5.1	Probabilidad anual de velocidad de viento	27
Figura 5.2	Escala de viento Beaufort	29
Figura 6.1	Instalación sistema medidor de par	31
Figura 6.2	Mecanismo regulador de la fuerza de frenado	31
Figura 6.3	Transductores de presión y DAQ	32
Figura 6.4	Instalación empleada en el ensayo	32
Figura 6.5	Señales obtenidas de la instalación instrumentada	33
Figura 6.6	Recta de calibrado Pitot VS Velocidad viento	34
Figura 6.7	Tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6009	35
Figura 6.8	Vista lateral y frontal del 4-Winds OJWT	36

Figura 6.9	Velocidad del aire a 1,00m de la salida del túnel en función de la frecuencia de giro de los motores de los ventiladores	37
Figura 6.10	Perfil de velocidades a $x=1,00m$ y a $x=2,00m$	37
Figura 6.11	Muestreo de un punto 5k samples 500Hz	42
Figura 7.1	Curva de potencia experimental extractor comercial a 9,70 m/s (Túnel 15Hz)	44
Figura 7.2	Curva de potencia experimental extractor comercial a 10,40 m/s de viento (Túnel 16Hz)	45
Figura 7.3	Curva de potencia experimental extractor comercial a 11 m/s de viento (Túnel 17Hz)	46
Figura 7.4	Curva de potencia experimental extractor comercial a 11,80 m/s de viento (Túnel 18Hz)	47
Figura 7.5	Curva de potencia experimental extractor comercial a 12,50 m/s de viento (Túnel 19Hz)	49
Figura 7.6	Conjunto de curvas de potencia del extractor comercial a diferentes velocidades de viento	50
Figura 7.7	Comparativa extractor comercial respecto tipologías generadores convencionales	51
Figura 8.1	Ejemplo significado de la nomenclatura NACA de 4 cifras	54
Figura 8.2	Extractor modificado con perfiles de ala NACA-0014	54
Figura 9.1	Curva de potencia experimental extractor modificado a 9,60 m/s de viento (Túnel 15Hz)	56
Figura 9.2	Curva de potencia experimental extractor modificado a 10,20 m/s de viento (Túnel 16Hz)	58
Figura 9.3	Curva de potencia experimental extractor modificado a 11 m/s de viento (Túnel 17Hz)	60
Figura 9.4	Curva de potencia experimental extractor modificado a 11,80 m/s de viento (Túnel 18Hz)	62
Figura 9.5	Curva de potencia experimental extractor modificado a 13 m/s de viento (Túnel 19Hz)	64
Figura 9.6	Conjunto de curvas de potencia del extractor modificado a diferentes velocidades de viento	65

Figura 9.7	Comparativa de curvas de potencia experimentales entre extractor comercial y modificado	66
Figura 10.1	Generación de la estela turbulenta debido al desprendimiento de la capa límite	68
Figura 10.2	Empleo de técnicas con "Tuft" en aeronáutica	70
Figura 10.3	Instalación del ensayo frontal metodología Tuft-Grid	71
Figura 10.4	Instalación del ensayo posterior metodología Tuft-Grid	72
Figura 10.5	Captura de imágenes en Tuft-Grid	72
Figura 10.6	Imagen original captada en posición de 90° de las alas respecto del túnel de viento	73
Figura 10.7	Imagen promedio en posición de 90° de las alas respecto del túnel de viento	74
Figura 10.8	Imagen original donde se ha eliminado el valor promedio del resto de imágenes en posición de 90° de las alas respecto del túnel de viento	74
Figura 11.1	Extractor comercial con boca de succión obstruida	83
Figura 11.2	Curva de potencia extractor comercial sin succión a 9,60 m/s de viento (Túnel a 15Hz)	85
Figura 11.3	Curva de potencia extractor comercial sin succión a 10,40 m/s de viento (Túnel a 16Hz)	87
Figura 11.4	Curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,00 m/s de viento (Túnel a 17Hz)	89
Figura 11.5	Curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,80 m/s de viento (Túnel a 18Hz)	91
Figura 11.6	Curva de potencia extractor comercial sin succión a 13,00 m/s de viento (Túnel a 19Hz)	93
Figura 11.7	Conjunto de curvas de potencia del extractor comercial sin succión a diferentes velocidades de viento	94
Figura 11.8	Comparativa de curvas de potencia experimentales entre extractor comercial, extractor modificado y extractor comercial sin succión	95
Figura A.1	Error en curvas experimentales del extractor comercial	105
Figura A.2	Error en curvas experimentales del extractor modificado	106
Figura A.3	Error en curvas experimentales del extractor comercial sin succión	107

Índice de Tablas

Tabla 5.1	Parámetros de la distribución de Rayleigh	25
Tabla 5.2	Tabla de probabilidad anual de viento	26
Tabla 6.1	Calibrado Pitot vs velocidad viento	34
Tabla 7.1	Resultados curva de potencia extractor comercial a 9,60 m/s de viento	44
Tabla 7.2	Resultados curva de potencia extractor comercial a 10,40 m/s de viento	45
Tabla 7.3	Resultados curva de potencia extractor comercial a 11 m/s de viento	46
Tabla 7.4	Resultados curva de potencia extractor comercial a 11,80 m/s de viento	47
Tabla 7.5	Resultados curva de potencia extractor comercial a 13 m/s de viento	48
Tabla 9.1	Resultados curva de potencia extractor modificado a 9,60 m/s de viento	55
Tabla 9.2	Resultados curva de potencia extractor modificado a 10,20 m/s de viento	57
Tabla 9.3	Resultados curva de potencia extractor modificado a 11 m/s de viento	59
Tabla 9.4	Resultados curva de potencia extractor modificado a 11,80 m/s de viento	61
Tabla 9.5	Resultados curva de potencia extractor modificado a 13 m/s de viento	63
Tabla 11.1	Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 9,60 m/s de viento	84
Tabla 11.2	Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 10,40 m/s de viento	86
Tabla 11.3	Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,00 m/s de viento	88
Tabla 11.4	Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,80 m/s de viento	90
Tabla 11.5	Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 13,00 m/s de viento	92
Tabla 12.1	Generación eléctrica por rango de velocidades	98
Tabla 12.2	Resultados anuales de generación eléctrica por el conjunto de generadores	99
Tabla A.1	Error experimental en CP y TSR para las diferentes configuraciones ensayadas	104

Índice de Ecuaciones

Ec. 4.1	Distribución de Weibull	10
Ec. 4.2	Energía cinética del aire	11
Ec. 4.3	Caudal másico del aire	11
Ec. 4.4	Potencia disponible en el caudal de aire	11
Ec. 4.5	Potencia por unidad de área	12
Ec. 4.6	Cantidad de movimiento lineal	13
Ec. 4.7	Cantidad de movimiento entre dos secciones del disco	14
Ec. 4.8	Fuerza sobre la hélice	14
Ec. 4.9	Diferencia de presiones en cada lado del disco	14
Ec. 4.10	Velocidad en función de V_1 y V_2	14
Ec. 4.11	Potencia mecánica extraída	15
Ec. 4.12	Potencia disponible	15
Ec. 4.13	Coefficiente de potencia	15
Ec. 4.14	Ecuación de Euler	19
Ec. 4.15	Ecuación de Euler aplicando hipótesis	19
Ec. 4.16	Tip Speed Ratio (TSR)	23
Ec. 4.17	Coefficiente de potencia (CP)	23
Ec. 4.18	Área frontal barrida por aerogeneradores de eje horizontal	24
Ec. 4.19	Área frontal barrida por aerogeneradores de eje vertical	24
Ec. 4.20	Área frontal barrida por el extractor	24
Ec. 6.1	Velocidad angular del extractor	39
Ec. 6.2	Par en el eje de giro del extractor	40
Ec. 6.3	Coefficiente de potencia en el extractor	40
Ec. 6.4	Tip Speed Ratio en el extractor	40
Ec. 12.1	Potencia mecánica extraída por el extractor	97
Ec. A.1	Propagación de errores en cocientes	104

1 Objeto del proyecto

1.1 Promotor del proyecto

El promotor del presente proyecto es la cadena hotelera NH Hotel Group, concretamente el Hotel NH Ciutat de Reus ubicado en la Avenida Marià Fortuny, 85 con código postal 43203 Reus – España.

Coordenadas UTM (Zona 31T): E 341794, N 4558397

1.2 Equipo redactor

El equipo redactor está formado por el alumno de 2º Curso del Máster en Ingeniería Industrial de la Universitat Rovira i Virgili con los siguientes datos:

- Nombre: Marcos Sánchez Serrano
- NIF: 47829018-N
- Dirección: C/ Dr. Mallafré Guasch 11 2º-3ª, 43005 Tarragona
- Estudios previos: Grado en Ingeniería Mecánica (2010-2014)

1.3 Resumen descriptivo del equipo a analizar

El equipo que se analizará corresponde a un extractor compuesto por una turbina mecánica de geometría aproximadamente esferoidal elaborada mediante corte y plegado de chapa en acero inoxidable. El diámetro del cabezal extractor es de 330mm existiendo en el mercado diferentes adaptadores inferiores para el acople con los conductos de extracción. Este es movido por el viento y debido a la forma de construcción genera succión en los conductos en los que se ha instalado.

Su principal finalidad es entonces la de mejorar el tiro en chimeneas o mejorar la ventilación en habitaciones o recintos, ofreciendo adicionalmente, una protección del conducto contra la lluvia. Un croquis del extractor a estudiar puede observarse en la Figura 1.1.

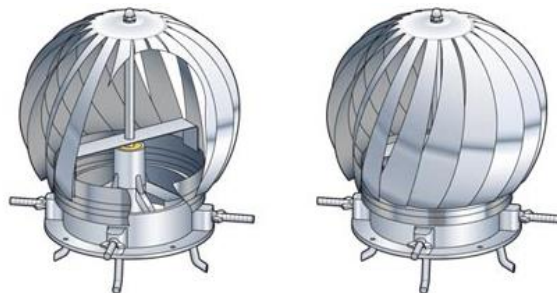


Figura 1.1: Dibujo esquemático del extractor comercial a estudiar

(Fuente: www.poujoulat.co.uk)

2 Problema de Investigación

2.1 Planteamiento del problema

El promotor dispone de una serie de estos extractores, anteriormente descritos, instalados en su edificación por lo que se plantea si sería viable la conversión de estos a generadores eólicos de electricidad. Se ha estimado que el promotor dispone de un conjunto de 14 extractores instalados tal y como puede intuirse en la figura 2.1:

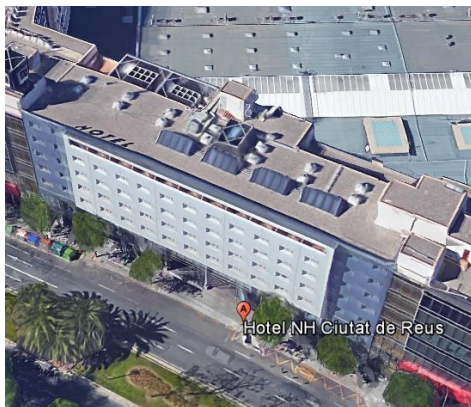


Figura 2.1: Perspectiva de la edificación Hotel NH Ciutat de Reus (*Fuente: Google Earth*)

El promotor está dispuesto a asumir la realización de ligeras modificaciones en los extractores siempre y cuando no supongan un coste elevado.

Puesto que no se ha establecido un coste máximo; el proyectista propondrá, si fuera necesario, modificaciones con el criterio de mínimo coste quedando la decisión final de viabilidad del proyecto por parte del promotor una vez facilitados los datos y estudios pertinentes.

2.2 Objetivos de la investigación

2.2.1 *Objetivos generales*

Dicho proyecto tiene por objetivo general el estudio, análisis y determinación de la eficiencia energética de un extractor eólico comercial, donde su principal función es la de renovación del aire interior en edificios y la mejora del tiro de las chimeneas. Se determinará si dicho extractor podría ser empleado como generador eólico de electricidad.

En su defecto, proponer modificaciones a realizar en dichos extractores con la finalidad de mejorar su rendimiento al mínimo coste.

En último lugar, analizar la viabilidad del proyecto.

2.2.2 Objetivos específicos

- Estudio y evaluación del recurso eólico en la zona de implantación.
- Descripción y justificación de la metodología empleada en el análisis energético del extractor.

2.3 Justificación del estudio

Con el objetivo de analizar la eficiencia energética del extractor eólico comercial, el promotor ha facilitado un ejemplar el cual será ensayado en el laboratorio 203 de Mecánica de Fluidos de la Universitat Rovira y Virgili mediante el uso del túnel de viento allí presente.

Con el ensayo se obtendrán las curvas de potencia que presenta dicho extractor desde un régimen "en vacío" (funcionamiento sin carga resistente) a un régimen de plena carga (carga resistente máxima donde el extractor se detiene) para diferentes velocidades del viento.

En generadores eólicos de electricidad comerciales, encontramos dichas curvas de potencia representadas con la potencia de generación eléctrica frente a la velocidad del viento, la cual es obtenida mediante el ensayo de dichos generadores en campo. En nuestro caso, actualmente al no tratarse de un generador eléctrico (no hay instalado ningún sistema de conversión de la energía mecánica a eléctrica) se elaborarán curvas mediante el Coeficiente de Potencia (CP) frente al Tip Speed Ratio (TSR), los cuales se describen en el apartado 4.4 del presente proyecto.

No obstante y como avance, el coeficiente de potencia representa la eficiencia en la conversión de la energía eólica en mecánica y el Tip Speed Ratio es el cociente entre la velocidad tangencial, en un instante de tiempo, en el extremo del alabe del rotor frente la velocidad del viento del terreno en ese mismo periodo. Realizando el ensayo variando el régimen de carga y manteniendo la velocidad del viento obtenemos una curva para cada velocidad de viento, permitiendo caracterizar la eficiencia particular de la turbina y comparar a que TSR se obtiene un mayor coeficiente de potencia y en que rango de velocidades de viento la turbina se comporta de forma más eficiente.

2.4 Limitaciones y alcance de la investigación

- Queda fuera del alcance del presente proyecto el estudio de la bajada del caudal y de las renovaciones/hora del aire en el interior del edificio en el caso de convertir dichos extractores a generadores eólicos y la evaluación de la posible afectación que pueda tener en la legislación aplicable del sector de la hostelería sobre los valores mínimos requeridos en dichos parámetros.
- Queda fuera del alcance del presente proyecto la definición a nivel de detalle de la instalación eléctrica, en el caso de que fuera viable la conversión de los extractores a generadores eléctricos.
- Queda fuera del alcance del presente proyecto, la evaluación de requisitos o discrepancias a lo referido a la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico; y lo establecido en el Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, donde se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.
- Debido a la extensión que produciría un análisis exhaustivo de la orografía de la zona de la edificación, se emplearán métodos estadísticos como la distribución de Weibull y Rayleigh para realizar el estudio eólico de la zona en la que está situada la edificación del promotor. Dichas técnicas son de uso frecuente en este tipo de estudios permitiendo realizar estimaciones con un valor elevado de precisión.

3 Condicionantes del proyecto

3.1 Condicionantes impuestos por el promotor

Debido a la naturaleza del proyecto, orientado a la investigación y ensayo del extractor eólico, el promotor no impone condicionantes más allá de que en caso de realizar modificaciones a los extractores para tratar de mejorar la eficiencia energética del mismo, no supongan un incremento elevado de coste; puesto que su intención es aprovechar lo que ya tienen instalado y conocer que posibilidades pueden barajar.

3.2 Condicionantes impuestos por legislación y normativa aplicable.

En el caso de realizar la modificación de los extractores eólicos a pequeños aerogeneradores eléctricos (AP) se deberá tener en cuenta lo establecido en la norma *UNE-EN 61400-2 Aerogeneradores. Parte 2: Aerogeneradores pequeños [1]*. A continuación se detallan las condiciones requeridas para este tipo de aerogeneradores instalados en redes locales.

a) Dispositivos de protección

Un sistema eléctrico de aerogenerador pequeño debe incluir dispositivos adaptados que garanticen una protección contra el mal funcionamiento del AP y del sistema eléctrico externo, que pueda llevar a una condición o estado de inseguridad. Esto debe hacerse conforme a las especificaciones 7.1 a 7.5 y 7.8 de la Norma IEC 60204-1:2005. Ejemplos de tales dispositivos son los fusibles para protección contra la sobreintensidad, los termistores para temperatura, etc.

b) Dispositivos de desconexión

Debe ser posible desconectar el sistema eléctrico del AP de toda fuente eléctrica cuando lo requiera el mantenimiento o los ensayos. Esto debe hacerse conforme a las especificaciones de los apartados 5.3.2 y 5.3.3 de la Norma IEC-60204-1:2005.

c) Sistema de puesta a tierra

El diseño de un aerogenerador pequeño debe incluir un sistema local de toma de tierra (masa) para cumplir con los requisitos de la Norma IEC-60364-5-54.

d) Conductores y cables eléctricos

Los conductores de un AP deben estar clasificados para la aplicación particular en función de la temperatura, la tensión, la intensidad, las condiciones ambientales y la exposición a los factores que favorecen la degradación, conforme al capítulo 13 de la Norma IEC 60204-1:2005.

Los límites de protección deben estar diseñados de manera que cualquier sobretensión transmitida a los equipos eléctricos no exceda los límites establecidos para los niveles de aislamiento de los equipos.

e) Recarga de baterías

Un aerogenerador pequeño destinado a su utilización como dispositivo de recarga de baterías debe estar diseñado para recargar la batería a la corriente y tensión apropiadas. Otros aspectos a considerar son la temperatura de la batería, la dilatación de la batería, el tamaño de los conductores y la clasificación del aislamiento.

El circuito de recarga debe poder resistir la tensión máxima durante una pérdida de carga o cuando las baterías están cargadas y la tensión se transfiere para otra utilización.

f) Conexión directa a motores eléctricos (Ej. bombeo de agua)

Los aerogeneradores pequeños que se conectan directamente a los motores pueden variar en tensión, en corriente y en frecuencia. La posibilidad de operar con seguridad sobre todo el rango de funcionamiento debe demostrarse.

g) Carga resistiva directa (Ej. Lámparas incandescentes)

Los aerogeneradores pequeños que se conectan directamente a cargas resistivas pueden variar en tensión, en corriente y en frecuencia. La posibilidad de operar con seguridad sobre todo el rango de funcionamiento debe demostrarse.

La documentación de un AP destinado a la conexión de una carga resistiva, tal como un calentador, debe especificar los conductores adaptados a la corriente, a la tensión y a las temperaturas implicadas.

3.3 Condicionantes del entorno físico y del extractor

Nos encontramos con una tipología de extractor eólico donde su diseño no está pensado para un aprovechamiento eficiente del recurso eólico, por lo que se prevé que su capacidad de convertir la energía cinética del viento a energía mecánica será baja.

Por otro lado, el emplazamiento de aerogeneradores eólicos en áreas urbanas no es lo más recomendable debido a la elevada rugosidad de la orografía y obstáculos presentes. Además, este tipo de extractor, queda instalado próximo al forjado de cubierta del edificio por lo que a pesar de estar instalado en la parte superior del edificio (aprox. 10m de altura) la altura de montaje no libra los posibles obstáculos que allí se encuentren por lo que se prevé que mayormente existirá un flujo turbulento incidente en el extractor.

4 Marco Teórico

4.1 Definición de términos

- **Velocidad media del viento:** media estadística de los valores instantáneos de la velocidad del viento promediados en un periodo de tiempo dado.
- **Distribución de Weibull:** función de distribución de probabilidad utilizada a menudo para velocidades de viento. Esta función depende de dos parámetros, el parámetro de forma que controla el ancho de la distribución y el parámetro de escala que controla la velocidad del viento media.
- **Distribución de Rayleigh:** función de distribución de probabilidad a menudo utilizada para velocidades de viento. Esta distribución depende de un parámetro de ajuste, el factor escala, que controla la velocidad del viento. Por otro lado, esta distribución es idéntica a una distribución de Weibull con un factor de forma igual a 2.
- **Aerogenerador pequeño (AP):** sistema con un área barrida por el rotor de 200m² o inferior que convierte la energía cinética del viento en eléctrica.
- **Área barrida:** área proyectada perpendicular a la velocidad del viento que un rotor describe durante una rotación completa. En aeroturbinas de eje vertical, como es el caso actual, es la superficie del rotor proyectada sobre un plano vertical.
- **Precisión:** concordancia entre el resultado de una medida y el verdadero valor de la magnitud a medir.
- **Producción anual de energía:** estimación de la producción total de energía de un aerogenerador durante un periodo de un año como resultado de aplicar la curva de potencia a diferentes distribuciones de frecuencia de velocidad del viento al centro del rotor, suponiendo un 100% de disponibilidad.
- **Terreno complejo:** terreno alrededor del emplazamiento de ensayo que presenta variaciones en la topografía y obstáculos del terreno que pueden causar una distorsión del flujo.
- **Conjunto de datos:** colección de datos que han sido muestreados durante un periodo continuo.
- **Coefficiente de potencia:** para el caso presente, coeficiente entre la potencia mecánica neta de un aerogenerador y la potencia disponible en el viento en flujo libre sobre la superficie barrida del rotor.
- **Rendimiento de potencia (curva de potencia):** Medida de la capacidad de un aerogenerador para producir potencia y energía eléctrica (en el caso actual será para producir energía mecánica).

4.2 Recurso eólico

El recurso para la generación de energía eólica es el viento, el cual es generado por corrientes de aire debido al desigual calentamiento de la superficie y la rotación de la Tierra. Así, la no uniformidad del flujo de radiación solar incidente hace que unas zonas se calienten más que otras, provocando movimientos convectivos de la masa atmosférica. El aire caliente asciende, arrastrando aire más frío proveniente de una región próxima. Al subir se enfría, por lo que aumenta su densidad, descendiendo para volver a repetir el ciclo. Así, el viento es una masa de aire en movimiento, y como tal, contiene una cierta energía cinética que será la que se intentará aprovechar mediante el extractor eólico, convirtiendo dicha energía cinética del viento en energía mecánica de rotación en el eje del rotor y posteriormente en energía eléctrica.

El fenómeno real es más complejo, ya que la Tierra se mueve sobre su eje, provocando gradientes de presión que tienden a arrastrar las masas de aire (Teorema de Coriolis). Además, la inercia térmica de los mares y océanos es distinta a la de los continentes, lo que crea gradientes variables con el día y la noche. [2], [3]

4.2.1 Aprovechamiento del viento

La energía del viento se origina por la energía radiante proveniente del sol, la cual se convierte en energía térmica al ser absorbida por la superficie terrestre. En cada uno de los pasos de conversión hay una serie de pérdidas, por lo que solamente un pequeño porcentaje del total de energía absorbida por la superficie se convierte en viento.

A parte de estas pérdidas, también hay que tener en cuenta que del viento no se puede extraer toda la energía. En el apartado 4.3.3 se explica la Ley de Betz, en la cual se concluye que la máxima cantidad de energía del viento que se puede extraer es del 59%.

4.2.2 Velocidad del viento

A pesar de las muchas ventajas que tiene la energía eólica (no agresiva con el medio ambiente, inagotable....) hay que tener en cuenta que tiene el inconveniente que el viento es disperso y aleatorio.

La velocidad del viento es una magnitud vectorial y ésta varía de forma aleatoria tanto en módulo como en dirección y sentido. Los valores medios suelen estar entre 3 y 7 m/s.

Sin embargo, y como se ha comentado en puntos anteriores, la orografía del terreno y la rugosidad presentan un papel importante.

En el caso de la orografía, si se presentan accidentes de terreno suaves como colinas o vaguadas influyen positivamente en la aceleración local del viento, en cambio un accidente abrupto disipa la energía del viento debido a las turbulencias generadas.

Por otro lado, la rugosidad del terreno determina como aumenta la velocidad del viento con la altura respecto al suelo y establece su perfil de velocidades. Por ello, en general, la velocidad del viento aumenta con la altura. Además, el perfil de viento se pronuncia más con el aumento de la rugosidad del suelo y la velocidad disminuye.

La rugosidad (parámetro α) mínima o de clase 0, se da en medios acuáticos como el mar, mientras que la muy notable de clases 3 y 4 implica cercanías de bosques o áreas urbanas. [3]

4.3 Bases teóricas

4.3.1 Caracterización energética del viento

La necesidad de optimizar el rendimiento de los aerogeneradores y de reducir el coste de generación de energía conduce a determinar el tipo de distribución de la velocidad del viento. Esta información también es necesaria para el análisis económico de viabilidad del proyecto del aerogenerador.

Midiendo las velocidades del viento durante un año en una zona determinada se observará que los fuertes vendavales tienen una probabilidad muy baja de presentarse, mientras que la probabilidad aumenta para velocidades moderadas de viento.

Esta relación entre las velocidades del viento y sus probabilidades puede ajustarse a algún tipo de distribución continua, lo que permitirá encontrar una expresión matemática que calcule la energía extraíble del viento en función del tiempo, típicamente un año.

A continuación, en la figura 4.1, se representa un ejemplo de histograma de velocidades, donde se puede aproximar a una función de densidad de probabilidad.

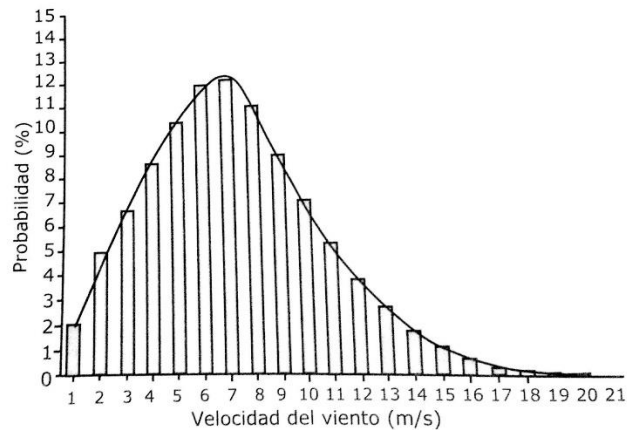


Figura 4.1: Histograma de velocidad de viento y probabilidad [3]

La función de densidad de probabilidad más flexible, al poder ajustarse a una gran variedad de dispositivos y que es la más ampliamente utilizada, es la distribución de Weibull cuya ecuación viene dada por la Ec.4.1:

$$f(v) = \frac{k}{v} \cdot \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad (\text{Ec.4.1})$$

donde:

k = parámetro de forma

k=1 la distribución es exponencial

k=2 la distribución es de Rayleigh

v= velocidad media del viento

C=parámetro de escala o velocidad característica del viento

El área encerrada por la curva es de valor 1, ya que la probabilidad de que el viento sople, incluyendo la velocidad 0 es del 100%. La mediana de la distribución, es decir, el valor central correspondiente a la probabilidad del 50%, en la figura anterior, es 8 m/s lo que significa que la mitad del tiempo el viento sopla a velocidades superiores y la otra mitad a inferiores a 8 m/s.

La velocidad más probable, es decir, la velocidad en el pico de la curva de distribución es de 7 m/s y se llama valor modal de la distribución.

La distribución estadística de la distribución de velocidades varía de un lugar a otro dependiendo de las condiciones climáticas, del paisaje y de las características orográficas y superficiales del terreno. Por consiguiente, la distribución de Weibull varía en el factor de forma k y en su valor medio.

El uso de estas técnicas permite estimar la capacidad de conversión de energía eólica efectiva de los sistemas de aerogeneración. En el apartado 5 de este proyecto se realiza el estudio eólico de la zona próxima al lugar de emplazamiento de los extractores eólicos a ensayar.

4.3.2 Potencia eólica disponible

La energía se define como la capacidad para realizar un trabajo. La potencia en cambio se define como la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo.

Por otro lado, conocemos que una masa de aire m con velocidad v posee una energía cinética E_c que viene definida por la Ec.4.2:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{Ec.4.2})$$

El caudal másico de aire \dot{m} de densidad ρ que fluye a través de una superficie de área A perpendicular a la dirección del flujo, viene dada por la ecuación de continuidad Ec.4.3:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{Ec.4.3})$$

Por lo tanto, la potencia disponible asociada al caudal de aire que atraviesa dicha sección resulta en la Ec.4.4:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{Ec.4.4})$$

De aquí podemos conocer la densidad de potencia o potencia por unidad de área, la cual se define en la Ec. 4.5

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{Ec.4.5})$$

De esta expresión se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La densidad de potencia depende de una ley cúbica con la velocidad. De aquí la importancia de que la instalación de los aerogeneradores sea a la mayor altura posible sobre el nivel del suelo, por lo que se ha comentado sobre el perfil de velocidades en el apartado 4.2.2, es decir que la velocidad crece con la altura.
- Dada la variación de la potencia con respecto a la velocidad según una ley cúbica, es muy importante para decidir la instalación de un aerogenerador disponer de medidas fiables de velocidad a la altura del centro de giro. Hay que tener en cuenta que cualquier error en la medición puede acarrear resultados no deseados en cuanto a la obtención de energía.
- La potencia eólica disponible es directamente proporcional al área considerada.
- La densidad de potencia depende linealmente de la densidad del aire, por lo que un aire frío presenta una densidad de potencia superior a una más caliente. Asimismo, y a igualdad de temperatura, un lugar situado a nivel del mar presentará una densidad de potencia mayor por el hecho de que la densidad del aire disminuye con la altura.

En cuanto al valor de esta potencia disponible hay que tener en cuenta otros factores que disminuirán su valor como son el límite de Betz, rozamientos aerodinámicos y mecánicos, rendimiento eléctrico.

4.3.3 Teoría ideal de los Aerogeneradores. Límite de Betz

El componente principal de una turbina eólica es el órgano intercambiador de energía, donde transforma la energía cinética del viento en energía mecánica.

El rendimiento ideal de un aerogenerador de hélice sin fricción fue hallado por A. Betz en 1920 empleando el modelo mostrado en la Figura 4.2:

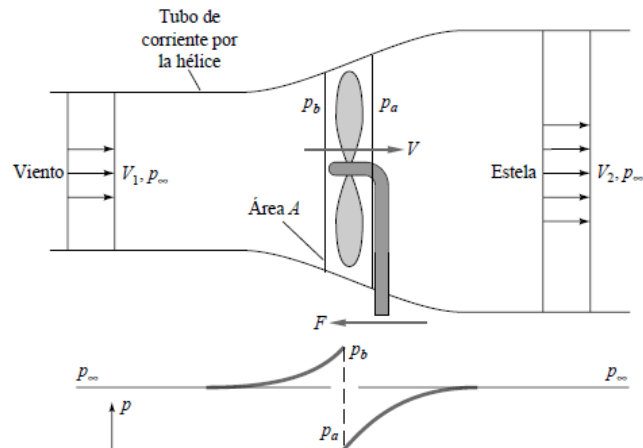


Figura 4.2: Análisis del flujo en un aerogenerador mediante la analogía del disco en un tubo de corriente [4]

La hélice se representa mediante un disco imaginario que produce un salto de presiones a través del plano de la hélice, que tiene un área A y donde la velocidad local del fluido es v . El viento se representa mediante un tubo de corriente con una velocidad de entrada v_1 y una velocidad de salida v_2 . La presión aumenta hasta p_b inmediatamente antes del disco y cae hasta p_a inmediatamente después, volviendo a recuperar la presión de la corriente libre en la estela aguas abajo. Como se muestra en la figura, para mantener la hélice en su posición mientras extrae energía del viento, debe existir una fuerza que se oponga a la del viento en su soporte.

Aplicando la ecuación de la cantidad de movimiento para un volumen de control situado entre las secciones 1 y 2, obtenemos la Ec.4.6:

$$\sum F_x = -F = \dot{m} \cdot (v_2 - v_1) \quad (\text{Ec.4.6})$$

Una relación similar para un volumen de control que se extiende entre dos secciones situadas justo delante y detrás del disco proporciona la Ec. 4.7:

$$\sum F_x = -F + (p_b - p_a) \cdot A = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) = 0 \quad (\text{Ec.4.7})$$

Igualando ambas ecuaciones se obtiene la fuerza sobre la hélice (Ec.4.8):

$$F = (p_b - p_a) \cdot A = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{Ec.4.8})$$

Teniendo en cuenta el flujo másico, $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$, constante en el tubo de corriente, se halla la diferencia de presiones a ambos lados del disco (Ec.4.9):

$$p_b - p_a = \rho \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{Ec.4.9})$$

Además, suponiendo que el flujo es ideal, se pueden calcular las presiones aplicando el Teorema de Bernoulli fuera del disco:

$$\text{De 1 a } b: \quad p_\infty + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_b + \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

$$\text{De } a \text{ a 2:} \quad p_a + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = p_\infty + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

Restando estas relaciones para sacar la diferencia de presiones e igualando a la expresión obtenida en la Ec. 4.8, se obtiene v en función de v_1 y v_2 :

$$p_b - p_a = \frac{\rho}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \rho \cdot \frac{(v_1 + v_2)}{2} \cdot (v_1 - v_2) = \rho \cdot v \cdot (v_1 - v_2)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{Ec.4.10})$$

La ecuación de la continuidad y la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento lineal exigen entonces que la velocidad v a través del disco sea igual a la media entre la velocidad del viento y la velocidad de la estela aguas abajo.

Finalmente, la potencia extraída por el disco se puede escribir en función de v_1 y v_2 combinando las ecuaciones Ec.4.8 y 4.10, obteniendo:

$$P_{mec} = F \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (\text{Ec.4.11})$$

Para una velocidad v_1 dada, la máxima potencia posible se obtiene derivando P_{mec} respecto a v_2 e igualando a cero. El resultado es:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad \text{para } v_2 = \frac{1}{3} \cdot v_1$$

que corresponde con $v = \frac{2}{3} \cdot v_1$ a través del disco.

La máxima potencia disponible en la hélice se obtiene de multiplicar el gasto másico a través de la hélice por la energía cinética total del viento:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (\text{Ec.4.12})$$

Por este motivo, el máximo rendimiento posible para un aerogenerador ideal sin fricción se suele escribir en función del llamado coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} = \frac{P_{mec}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} \quad (\text{Ec.4.13})$$

Usando la P_{max} se obtiene el máximo coeficiente de potencia:

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0,593$$

Este es el denominado límite de Betz, que sirve como referencia ideal con la que comparar el rendimiento de un aerogenerador real.

Cabe recordar que estas ecuaciones se han deducido a partir de un flujo ideal sin fricción y que en el proceso no se ha tenido en cuenta la naturaleza del órgano intercambiador de energía. En la realidad, el coeficiente de potencia siempre será menor que el número de Betz. Las conclusiones básicas se resumen a continuación:

- La potencia mecánica que se puede extraer del viento aumenta con la velocidad de éste elevada al cubo.
- La potencia crece linealmente con el área transversal del órgano intercambiador y por tanto con el cuadrado de su radio. Esto explica el por qué del gran tamaño de los aerogeneradores de gran potencia.
- Incluso con flujo ideal sin fricción, y por tanto sin pérdidas, el ratio de extracción de trabajo mecánico del viento está limitado a 0,593. Por lo que, en el mejor de los casos, solo alrededor del 60% de la energía eólica que atraviesa el generador podrá convertirse en energía mecánica.

En la figura 4.3 se detalla un diagrama con los coeficientes de potencia típicos para las diferentes tipologías de aerogeneradores comerciales. Dicho diagrama está contrastado con el Tip-Speed Ratio (TSR) el cual se detalla en el apartado 4.4.1:

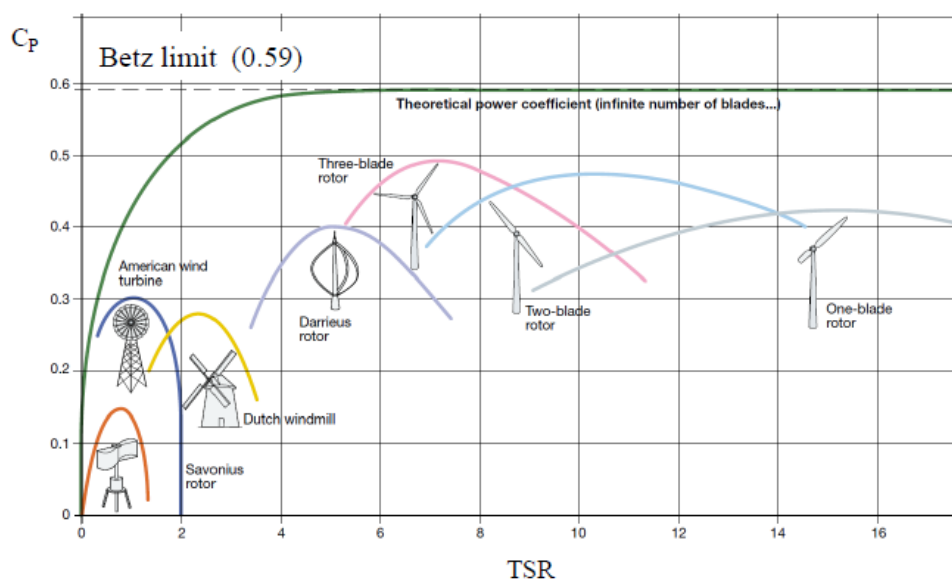


Figura 4.3: Coeficientes de potencia típicos para diferentes tipologías de aerogeneradores [5]

4.3.4 Fuerzas sobre cuerpos sustentadores. Perfil de Ala

En el presente punto se planteará la teoría básica de los perfiles de ala, empleados en aerogeneradores, puesto que en el caso de proponer modificaciones en el extractor se optaría principalmente por las variantes del tipo rotor Savonius o Darrieus (cada tipología puede intuirse en la Figura 4.3 presentada anteriormente).

La teoría ideal de los aerogeneradores planteada por Betz proporciona el límite ideal de extracción de potencia mecánica de una corriente de aire sin considerar la naturaleza del órgano intercambiador. No obstante, la potencia que se puede obtener en un aerogenerador va fuertemente ligada con las características del mismo y de las fuerzas aerodinámicas utilizadas para producir energía mecánica.

Todo cuerpo inmerso en una corriente de fluido experimenta una fuerza aerodinámica cuyas componentes se denominan resistencia aerodinámica (D), paralela a la velocidad del fluido, y sustentación aerodinámica (L), perpendicular a la velocidad del fluido. El coeficiente de potencia real variará en gran medida en relación de si se emplea la resistencia o la sustentación como fuerza generadora de par en el aerogenerador.

Si la forma del perfil permite la utilización de la fuerza de sustentación aerodinámica, se podrán alcanzar coeficientes de potencia mayores ya que su utilización incrementa de forma considerable la eficiencia. Un ejemplo de aerogenerador que emplea este tipo de fuerza, y que nos podría ser de utilidad para el extractor, sería el rotor del tipo Darrieus (ver Figura 4.3)

No obstante, es necesario plantear los conceptos básicos y las características que presentan los flujos alrededor de cuerpos inmersos en corrientes fluidas. Estos flujos presentan efectos viscosos (de cortadura y no deslizamiento) cerca de las superficies del cuerpo, aunque típicamente, son prácticamente no viscosos lejos del cuerpo.

La técnica del análisis de capa límite puede utilizarse para calcular los efectos viscosos cerca de las paredes sólidas y acoplar estos al movimiento exterior no viscoso. Este acoplamiento es tanto más efectivo cuanto mayor sea el número de Reynolds basado en el cuerpo (ya que se toma la del cuerpo como longitud característica) como se muestra en la Figura 4.4.

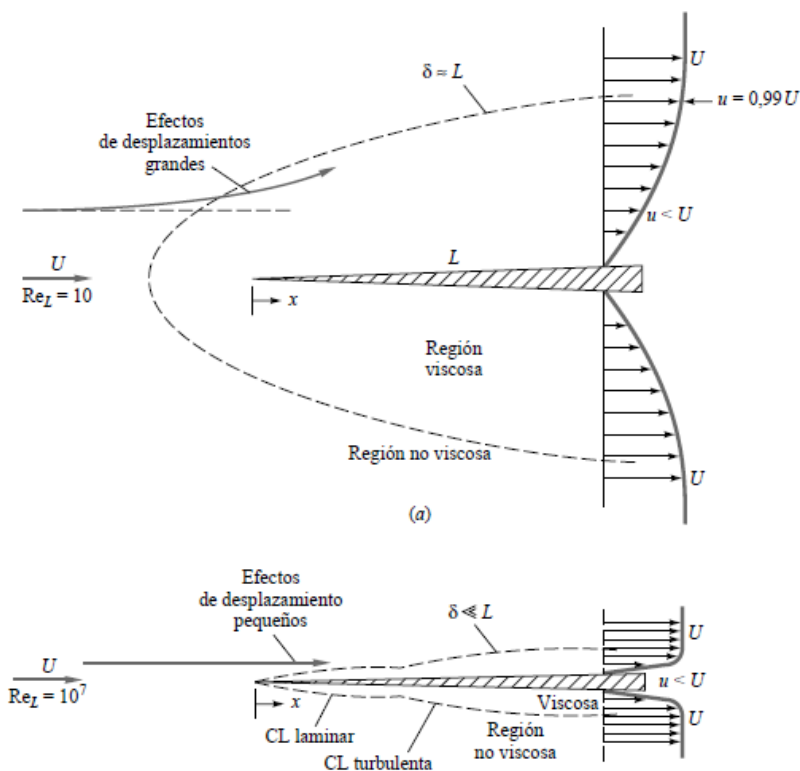


Figura 4.4: Comparación del flujo alrededor de una placa plana: (a) flujo laminar a bajos números de Reynolds; (b) flujo a altos números de Reynolds [4]

Si el número de Reynolds es bajo, la región viscosa es muy ancha y se extiende lejos aguas arriba y a los lados de la placa. La placa frena mucho la corriente incidente, y pequeños cambios en los parámetros del flujo originan grandes cambios en la distribución de presiones a lo largo de la placa. Aunque en un principio sería posible empalmar las zonas viscosa y no viscosa mediante un análisis matemático, su interacción es fuerte y no lineal.

No existe una teoría simple para el análisis de flujos externos en el intervalo de número de Reynolds desde 1 a 1000. En general, estos flujos con capas viscosas gruesas se estudian experimentalmente o mediante CFD (dinámica de fluidos computacional).

Sin embargo, los flujos a altos números de Reynolds (como será el caso en el que nos encontramos) son mucho más fáciles de tratar mediante el acoplamiento de la capa límite, como mostro Prandtl. Las capas viscosas, tanto laminares como turbulentas son muy delgadas. Este hecho permite que se pueda despreciar el efecto de desplazamiento en la corriente no viscosa. De este modo, la distribución de presiones a lo largo de la placa se puede determinar de la teoría no viscosa, como si la capa límite no existiese.

Esto es de gran utilidad, ya que para cuerpos esbeltos, como es el caso de los perfiles de ala, la suposición de que la interacción entre la capa límite y la distribución de presiones de la corriente exterior es despreciable constituye una excelente aproximación.

De este modo, podemos dar una explicación física de la fuerza de sustentación, mediante la ecuación de Euler (ecuación de la cantidad de movimiento para flujos no viscosos). Dicha explicación es que la forma de estos perfiles obliga a las líneas de corriente a curvarse alrededor de su geometría y es sabido que se necesita un gradiente de presión para curvar las líneas de corriente. Empleando la ecuación de Euler (Ec.4.14) en coordenadas cilíndricas, la componente r de la misma, despreciando la gravedad y asumiendo que la única componente de la velocidad es v_θ , resulta en la Ec. 4.15:

$$\rho \cdot \vec{g} - \Delta p = \rho \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (\text{Ec.4.14})$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \cdot \frac{v_\theta^2}{r} \quad (\text{Ec.4.15})$$

Donde r es la curvatura de la línea de corriente y v_θ la velocidad del fluido.

Como existe una presión atmosférica P_0 lejos del perfil, debe haber entonces una presión menor que la atmosférica en la parte superior del perfil y otra mayor en la parte inferior, teniendo en cuenta que el incremento de p es inversamente proporcional a la del radio. Como resultado, y de forma más intuitiva, se puede observar en la Figura 4.5:

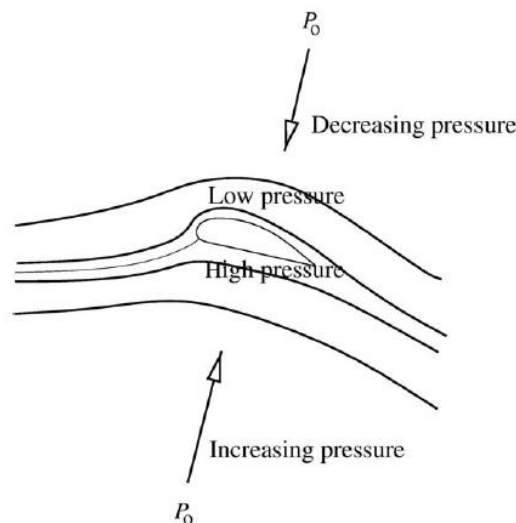


Figura 4.5: Explicación de la generación de la sustentación [6]

Esta diferencia de presiones es la que proporciona el empuje ascensional o la fuerza de sustentación al perfil. Naturalmente, se tratará de maximizar el cociente L/D para aprovechar al máximo la capacidad de sustentación del perfil, proporcionando así grandes fuerzas perpendiculares a la corriente no perturbada y ofreciendo la mínima resistencia. En la Figura 4.6 se indican las características físicas principales de un perfil de ala.

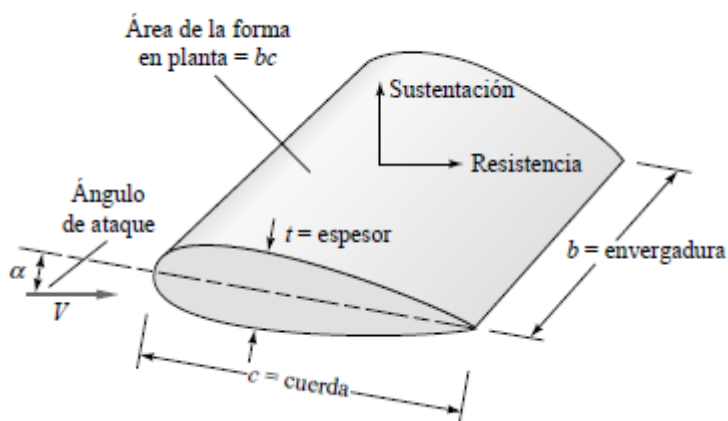


Figura 4.6: Definiciones para una superficie sustentadora [4]

El ángulo entre la corriente no perturbada y la cuerda se denomina ángulo de ataque α . La sustentación L y la resistencia D variarán con el ángulo. Las fuerzas adimensionales están definidas con respecto al área de la forma plana del perfil $A_p=bc$

Coefficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_p} = \frac{\text{Sustentación}}{\text{Fuerza Dinámica}}$$

Coefficiente de arrastre:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_p} = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Fuerza Dinámica}}$$

Para los aerogeneradores, en los cuales no se pasa nunca la velocidad del sonido, los coeficientes de sustentación y resistencia son únicamente función de α y del número de Reynolds, basado en la longitud de la cuerda c y la velocidad del viento. A pequeños ángulos de ataque, el gradiente de presión no es lo suficientemente fuerte como para que se desprenda la capa límite y el flujo alrededor del perfil es suave.

Sin embargo, cuando aumenta el ángulo de ataque, el gradiente se hace más intenso, formándose, generalmente, una burbuja de separación que crece extendiéndose aguas arriba sobre el extradós (nombre que recibe la parte superior del perfil). A cierto ángulo α comprendido entre 15° y 20° , la corriente está completamente desprendida del extradós, como se muestra en la Figura 4.7. Se dice así que el perfil está en pérdida: la sustentación decae bruscamente, la resistencia aumenta considerablemente y el perfil deja de cumplir su función aerodinámica.

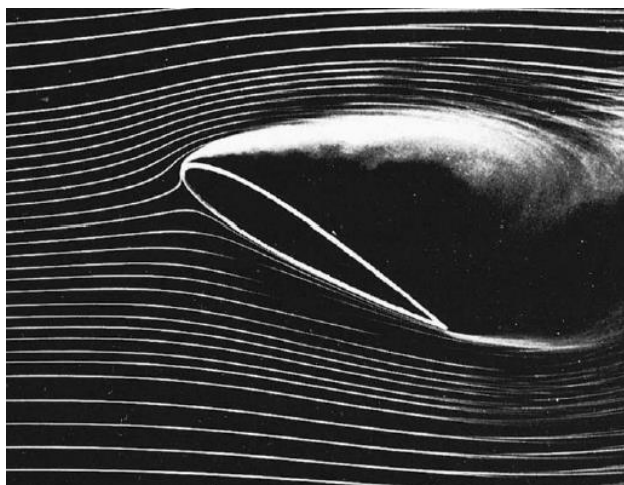


Figura 4.7: Separación de la corriente en la superficie superior de un perfil sustentador en pérdida [4]

En cuanto a la dependencia del número de Reynolds, llegado un cierto valor suficientemente elevado de éste, especialmente en el caso de la resistencia, su influencia es muy limitada. El valor de Reynolds en el que esto ocurre corresponde con aquel en que se produce la transición entre régimen laminar y turbulento en la capa límite. Como normalmente en la práctica los números de Reynolds son elevados en estos perfiles, del orden de 10^6 - 10^7 , puede considerarse que los coeficientes C_L y C_D dependen fundamentalmente del ángulo de ataque α .

4.3.5 Curvas de potencia

La curva de potencia es una de las principales herramientas para el diseño de aerogeneradores. Mayormente, ésta se encuentra representada en forma de gráfico y los fabricantes proporcionan dicha información para conocer la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades de viento. Dichas curvas son obtenidas mediante medidas en campo con anemómetros y analizando en la salida la potencia eléctrica generada.

En nuestro caso, la curva de potencia vendrá definida por el coeficiente de potencia (C_p) el cual estará en función de la potencia mecánica generada y el TSR cuyo valor depende principalmente del comportamiento aerodinámico de los álabes del extractor. La curva CP-TSR posee toda la información necesaria para conocer el desempeño del rotor para todo el rango de operación, ya que en el TSR se encuentran la velocidad de rotación y la de corriente libre del aire, y en el valor de CP la relación entre la potencia obtenida frente a la disponible.

Los datos de estas curvas se pueden obtener de forma numérica o por ensayos, siendo esta última una metodología más costosa pero con valores reales frente a la primera, que representa valores teóricos que pueden diferir en mayor o menor medida de la realidad pero más rápidos de obtener, siempre y cuando dispongamos de bases de coeficientes aerodinámicos tabulados para el tipo de perfil a utilizar para el número de Reynolds de trabajo. Estos valores que se deberían tener en cuenta en un cálculo numérico son los coeficientes de sustentación y arrastre indicados en el punto anterior.

Puesto que en nuestro caso, el extractor no emplea álabes comúnmente utilizados en generación eléctrica, no encontraremos dichos valores tabulados por lo que ya no se plantea un análisis numérico y se realizará directamente el ensayo del extractor proporcionado por el promotor. Dicho ensayo se basará en obtener estas curvas de potencia para obtener la eficiencia y los rangos de trabajo óptimos del extractor.

4.4 Principales variables

4.4.1 Velocidad relativa TSR (λ):

La velocidad relativa o "Tip Speed Ratio" es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto del rotor y sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. El TSR indica que la periferia del álabe circula a una velocidad TSR veces que la velocidad del viento v y es la relación entre la velocidad periférica del alabe (la del punto más exterior a partir del eje de rotación), y la velocidad del viento. Viene definida a partir de la Ec.4.16:

$$TSR = \frac{V_{periferiaPala}}{V_{viento}} = \frac{r \cdot \omega}{v} \quad (\text{Ec.4.16})$$

donde:

- ω es la velocidad angular del rotor (rad/s)
- r el radio del aerogenerador (m)
- v la velocidad del viento (m/s)

4.4.2 Coeficiente de Potencia (C_p):

El coeficiente de potencia o rendimiento aerodinámico representa la relación entre potencia de la energía de salida (mecánica o eléctrica dependiendo del caso) y la potencia disponible en el viento. Este coeficiente permite valorar el rendimiento y la capacidad de extracción de la energía que queremos utilizar respecto la energía de suministro como es la eólica. En nuestro caso, la C_p viene definida tal como se representa en la Ec.4.17:

$$C_p = \frac{Pot_{Mecánica}}{Pot_{Eolica}} = \frac{M \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3} \quad (\text{Ec.4.17})$$

donde:

- M es el par que se ejerce en el eje del extractor (N.m)
- ω es la velocidad angular del rotor (rad/s)
- A representa la sección de paso a través del extractor (m²)
- ρ hace referencia a la densidad del aire (kg/m³)
- v es la velocidad del aire (m/s)

4.4.3 Área frontal barrida:

El área A barrida por el rotor y que éste presenta frontalmente al viento, es un parámetro que se utiliza con cierta frecuencia en los cálculos de energía eólica.

Para un rotor de hélice de diámetro D de eje horizontal, esta área A es la superficie total barrida por las palas, perpendicular a la dirección del viento, representada en la Ec. 4.18:

$$A_H = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{Ec.4.18})$$

Para máquinas de eje vertical (viento transversal), con un radio uniforme alrededor del eje de rotación, el área barrida se representa en la Ec. 4.19:

$$A_V = \text{altura} \cdot \text{anchura} = h \cdot d \quad (\text{Ec.4.19})$$

Puesto que en el caso que nos concierne, con el extractor, su forma geométrica se aproxima y por tanto su área frontal que presente al flujo de viento se aproxima a una media circunferencia, tal como se aprecia en la Figura 4.8, aproximaremos en el cálculo que el área barrida por el extractor viene definida por la Ec. 4.20:

$$A_E = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot 2} = \frac{\pi \cdot D^2}{8} \quad (\text{Ec.4.20})$$



Figura 4.8: Extractor proporcionado por el promotor

5 Estudio Eólico de la zona

Puesto que para la realización del presente proyecto no existen medidas en campo al largo de un año del emplazamiento real donde están instalados los extractores eólicos, se empleará la distribución de Rayleigh con datos referentes a la estación meteorológica instalada en el Complex Educatiu de Tarragona, los cuales han sido tomados durante 1 año a 10m de altura el año 2014. Estos datos han sido facilitados por el profesorado del Área de Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Rovira i Virgili.

Se ha decidido emplear estos datos, puesto que otros emplazamientos más cercanos a las instalaciones del promotor habían sido tomados a 3m de altura, de forma que con los datos a 10m se espera obtener resultados más representativos y, aunque no son datos exactos del emplazamiento, si nos permitirá obtener un orden de magnitud de la capacidad de generación de los extractores.

Una vez conocidas las bases teóricas para el estudio eólico presentadas en el punto 4.3.1, se recomienda utilizar la distribución de Rayleigh ($k=2$) para obtener una primera aproximación si no se conoce con exactitud la morfología del terreno y se dispone de una muestra suficientemente grande (habitualmente 1 año), por lo que será este tipo de distribución la que se empleará en el estudio eólico del terreno en el presente proyecto.

En la Tabla 5.1 se presentan los parámetros empleados para el desarrollo de la distribución de Rayleigh obtenida a partir de los valores de velocidad del viento anual tomados cada hora, obteniendo un total de 8760 muestras:

Tabla 5.1: Parámetros de la distribución de Rayleigh

Parámetros Distribución Rayleigh	
<i>Velocidad viento media anual (m/s)</i>	4,751
<i>Factor k (forma)</i>	2
<i>Factor C (Escala)</i>	4,751

Con estos valores se procede a elaborar una tabla en hoja de cálculo donde conociendo el valor máximo de velocidad del viento anual que sopló el año 2014, en el Complex Educatiu de Tarragona, de 25,3 m/s y el valor mínimo de 0 m/s (cuando el instrumento llega a su capacidad máxima de precisión en la medida de la velocidad), podemos determinar que el rango en las medidas será de 25,3 m/s.

Posteriormente, se decide elaborar dicha tabla con un total de 50 intervalos por lo que podemos determinar el valor de la amplitud de cada intervalo siendo él la relación entre el rango y el número de intervalos obteniendo un valor de $0,506 \approx 0,5$ m/s. Obtenidos estos valores, podemos elaborar la Tabla 5.2 donde se representa la probabilidad relativa y acumulada de viento anual, a partir de la distribución de Rayleigh, para cada rango de velocidades del viento.

Tabla 5.2: Tabla de probabilidad anual de viento (s./ distribución de Rayleigh)

Nº	Intervalo velocidades (m/s)			Total horas anuales	Probabilidad (Dist. Rayleigh)	Probabilidad Acumulada
	Lim. Inferior	Lim. Superior	Marca Clase			
1	0,00	0,50	0,25	20	4,38%	1,10%
2	0,51	1,01	0,76	164	8,56%	4,42%
3	1,02	1,52	1,27	420	12,16%	9,73%
4	1,53	2,03	1,78	696	14,99%	16,69%
5	2,04	2,54	2,29	958	16,91%	24,86%
6	2,55	3,05	2,8	874	17,90%	33,78%
7	3,06	3,56	3,31	743	17,99%	42,97%
8	3,57	4,07	3,82	651	17,31%	52,00%
9	4,08	4,58	4,33	595	16,02%	60,52%
10	4,59	5,09	4,84	508	14,31%	68,27%
11	5,10	5,60	5,35	480	12,37%	75,08%
12	5,61	6,11	5,86	509	10,36%	80,88%
13	6,12	6,62	6,37	300	8,41%	85,66%
14	6,63	7,13	6,88	259	6,64%	89,49%
15	7,14	7,64	7,39	237	5,10%	92,47%
16	7,65	8,15	7,9	215	3,81%	94,73%
17	8,16	8,66	8,41	147	2,77%	96,40%
18	8,67	9,17	8,92	155	1,96%	97,59%
19	9,18	9,68	9,43	126	1,35%	98,43%
20	9,69	10,19	9,94	113	0,91%	99,00%
21	10,20	10,70	10,45	107	0,59%	99,37%
22	10,71	11,21	10,96	105	0,38%	99,62%
23	11,22	11,72	11,47	61	0,24%	99,77%
24	11,73	12,23	11,98	45	0,14%	99,87%
25	12,24	12,74	12,49	40	0,08%	99,92%
26	12,75	13,25	13	47	0,05%	99,96%
27	13,26	13,76	13,51	45	0,03%	99,98%
28	13,77	14,27	14,02	25	0,02%	99,99%
29	14,28	14,78	14,53	18	0,01%	99,99%
30	14,79	15,29	15,04	13	0,00%	100,00%
31	15,30	15,80	15,55	16	0,00%	100,00%

32	15,81	16,31	16,06	16	0,00%	100,00%
33	16,32	16,82	16,57	7	0,00%	100,00%
34	16,83	17,33	17,08	9	0,00%	100,00%
35	17,34	17,84	17,59	4	0,00%	100,00%
36	17,85	18,35	18,1	1	0,00%	100,00%
37	18,36	18,86	18,61	10	0,00%	100,00%
38	18,87	19,37	19,12	4	0,00%	100,00%
39	19,38	19,88	19,63	4	0,00%	100,00%
40	19,89	20,39	20,14	5	0,00%	100,00%
41	20,40	20,90	20,65	3	0,00%	100,00%
42	20,91	21,41	21,16	1	0,00%	100,00%
43	21,42	21,92	21,67	0	0,00%	100,00%
44	21,93	22,43	22,18	1	0,00%	100,00%
45	22,44	22,94	22,69	2	0,00%	100,00%
46	22,95	23,45	23,2	0	0,00%	100,00%
47	23,46	23,96	23,71	0	0,00%	100,00%
48	23,97	24,47	24,22	0	0,00%	100,00%
49	24,48	24,98	24,73	0	0,00%	100,00%
50	24,99	25,49	25,24	1	0,00%	100,00%
				n=	8760	

Para que resulte de forma más clara e intuitiva, se presentan dichos valores en forma de gráfico en la Figura 5.1:

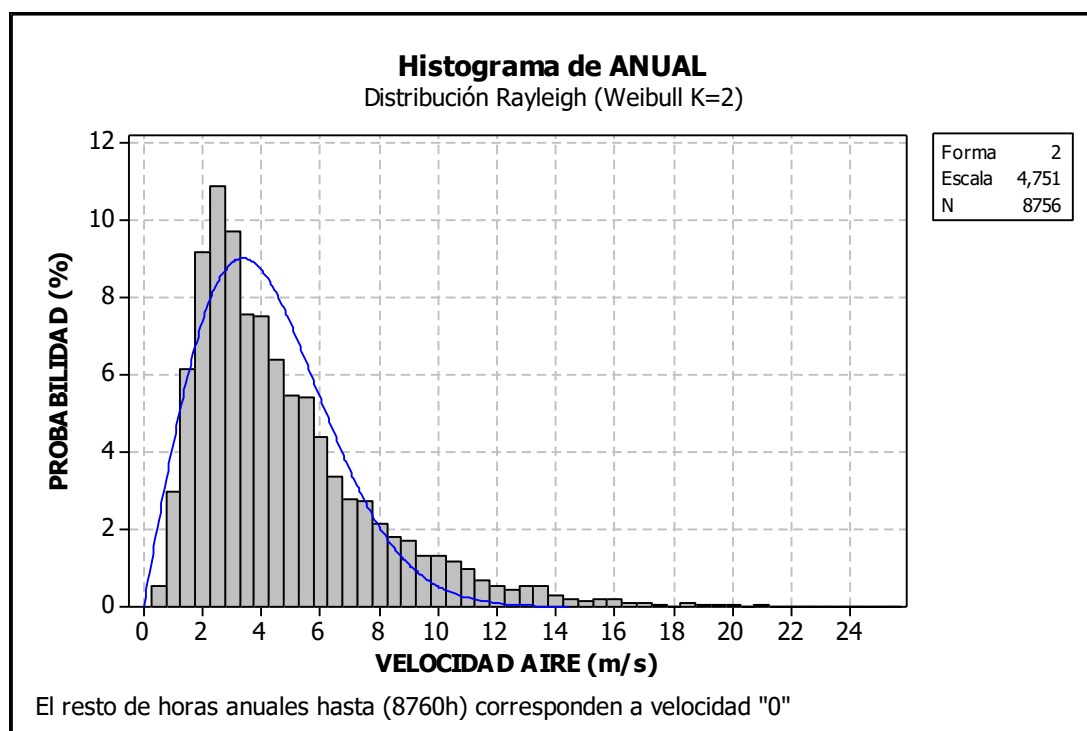


Figura 5.1: Probabilidad anual de velocidad de viento

Observando estos valores podemos concluir:

- La mediana de la distribución es aproximadamente 4 m/s por lo que el 50% del tiempo soplará a velocidades superiores a 4 m/s y la otra mitad del tiempo a velocidades inferiores.
- La velocidad del viento media es de 4,75 m/s, puesto que este valor es el promedio de las observaciones de la velocidad del viento en el emplazamiento.
- El valor modal de las velocidades del viento, el valor más común a lo largo del año, es de 2,5 m/s (*valor determinado de la muestra de datos*).
- Como puede observarse, la distribución de velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. En ocasiones se presentarán velocidades del viento altas (consideramos a partir de 8 m/s) pero son muy raras.
- Obtenemos que aproximadamente el 50% del tiempo estamos en velocidades del viento del tipo: calma, ventolinas, flojito o flojo (ver Figura 5.2), por lo que teniendo en cuenta velocidades de conexión de turbinas eólicas comerciales las cuales se encuentran alrededor de 3-5 m/s esta parte del tiempo los extractores, en caso de convertirlos a generadores eléctricos, no funcionarían.

Cifra	Nombre	Velocidad en			Efectos del viento en alta mar
		nudos	metros/seg.	>km/h	
0	calma	1	0 - 0,2	1	Mar como un espejo
1	ventolina	1 - 3	0,3 - 1,5	1 - 5	Rizos como escamas de pescado pero sin espuma.
2	flojito	4 - 6	1,6 - 3,3	6 - 11	Pequeñas olas, crestas de apariencia vítrea, sin romperse
3	flojo	7 - 10	3,4 - 5,4	12 - 19	Pequeñas olas, crestas rompientes, espuma de aspecto vítreo aislados vellones de espuma
4	bonancible-moderado	11 - 16	5,5 - 7,9	20 - 28	Pequeñas olas creciendo, cabrilleo numeroso y frecuente de las olas
5	fresquito	17 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	Olas medianas alargadas, cabrilleo (con salpicaduras)
6	fresco	22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	Se forman olas grandes, crestas de espuma blanca (salpicaduras frecuentes)
7	frescachón	28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	El mar crece; la espuma blanca que proviene de las olas es arrastrada por el viento
8	temporal	34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	Olas de altura media y mas alargadas, del borde superior de sus crestas comienzan a destacarse torbellinos de salpicaduras
9	temporal fuerte	41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	Grandes olas, espesas estelas de espuma a lo largo del viento, las crestas de las olas se rompen en rollos, las salpicaduras pueden reducir la visibilidad

Figura 5.2: Escala de viento Beaufort (*Fuente: Agencia Estatal de Meteorología*)

6 Metodología de análisis

6.1 Técnica empleada en el estudio

Con la finalidad de obtener las curvas de potencia con las variables CP en función del Tip Speed Ratio (λ), ha sido necesario instrumentar el extractor proporcionado por el promotor y, en parte, el túnel de viento utilizado tal y como se indicó en el punto 2.3 del presente proyecto. El conjunto de instrumentos, conectados una tarjeta de adquisición de datos, permite obtener dichos datos en el PC para el posterior tratamiento, análisis y poder obtención de los resultados.

En la realización del ensayo, ha sido necesario poder medir la velocidad de la corriente de viento incidente sobre el extractor, la velocidad de rotación y el par que se genera en el eje del mismo.

La metodología que se han empleado para adquirir estos datos ha sido obtener la velocidad de la corriente de viento mediante un tubo pitot y el par en el eje del extractor mediante el uso de células de carga. Por otro lado, la velocidad de rotación se ha obtenido de forma manual midiendo el tiempo que tardaba el extractor en realizar diez vueltas. Con la finalidad de reducir el error humano, se realizaron tres mediciones de cada tiempo empleando el promedio del mismo.

En referencia a la medición del par, primeramente se trató de emplear un medidor de par instalado en el propio eje del extractor. No obstante, debido a su elevada sensibilidad frente a vibraciones que recibía y a causa de que el extractor, debido a su construcción, no proporciona un giro equilibrado; las mediciones obtenidas no arrojaban resultados coherentes y finalmente, terminó con el deterioro del medidor.

Debido a esta causa, se decidió emplear dos células de carga, de tipo piezoeléctrico, instaladas en la parte posterior del extractor y unidas mediante una cuerda, la cual realizaba la función de freno sobre el extractor a medida que se tensaba. Con esta instalación se pretende simular la carga que ejercería un generador eléctrico conectado al extractor.

Para ello, fue necesario la elaboración de un carril-guía y un móvil que permitiera instalar las células y que fuese capaz de controlar, de forma voluntaria, la fuerza ejercida; con la finalidad de controlar la fuerza de frenado sobre el extractor. En la Figura 6.1 se puede apreciar la instalación anteriormente indicada.

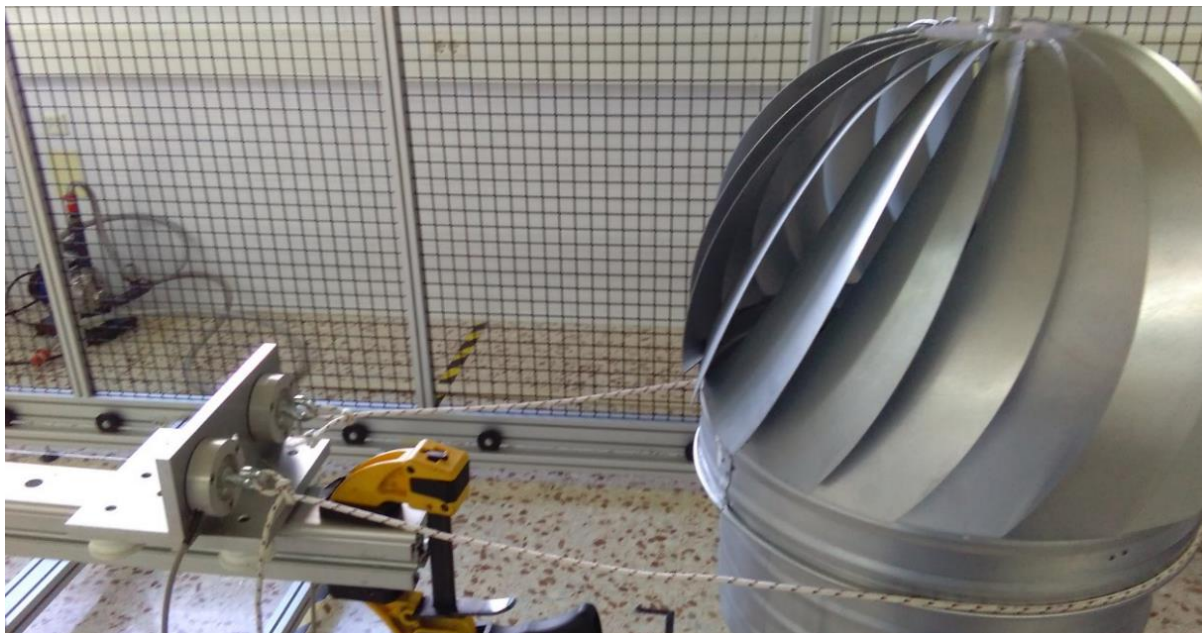


Figura 6.1: Instalación sistema medidor de par

Para controlar la fuerza de frenado ejercida, se empleó un sistema similar al de un carro portaherramientas de un torno unido al móvil donde se instalaron las células de carga, tal como se indica en la Figura 6.2. Para una correcta medición de las células se requiere intercalar un amplificador de señal previo al DAQ.



Figura 6.2: Mecanismo regulador de la fuerza de frenado

Conocidas las dimensiones donde se ejercía la fuerza de frenado en el extractor respecto a su eje, permitió determinar el par ejercido en el mismo.

En siguiente lugar, para poder medir la velocidad del viento se ha realizado mediante un tubo pitot, instalado en la parte superior del extractor. Mediante el uso de un transductor de presión, se realiza la conversión entre la medición física del tubo de Pitot a una señal de tensión (V) interpretable por el PC. En la Figura 6.3 se observan el conjunto de transductores de presión y la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).



Figura 6.3: Transductores de presión y DAQ

En la Figura 6.4 se puede intuir la instalación anteriormente indicada:

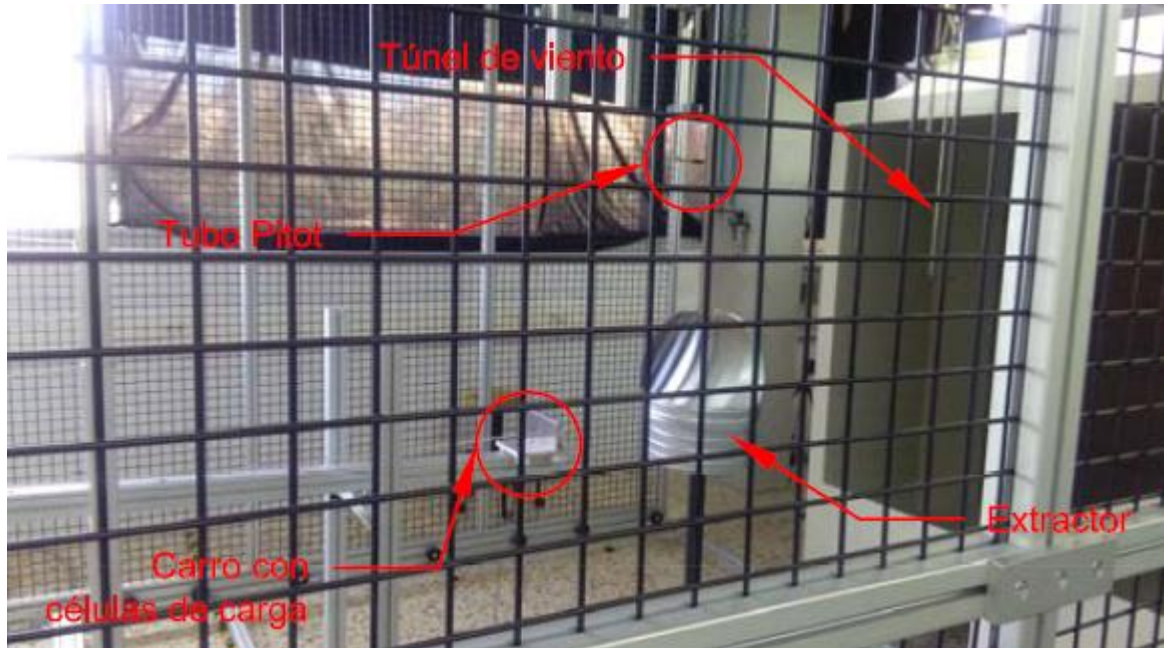


Figura 6.4: Instalación empleada en el ensayo

Finalmente, y como ejemplo, en la Figura 6.5 se indica una muestra de las señales que se obtienen en el PC una vez la instalación se encuentra en funcionamiento. En la figura se puede apreciar la señal de velocidad de viento procedente del tubo pitot y transductores de presión (señal blanca), y las dos señales procedentes de las células de carga (verde y roja). También se observa la fuente de tensión necesaria para alimentar el transductor de presión.

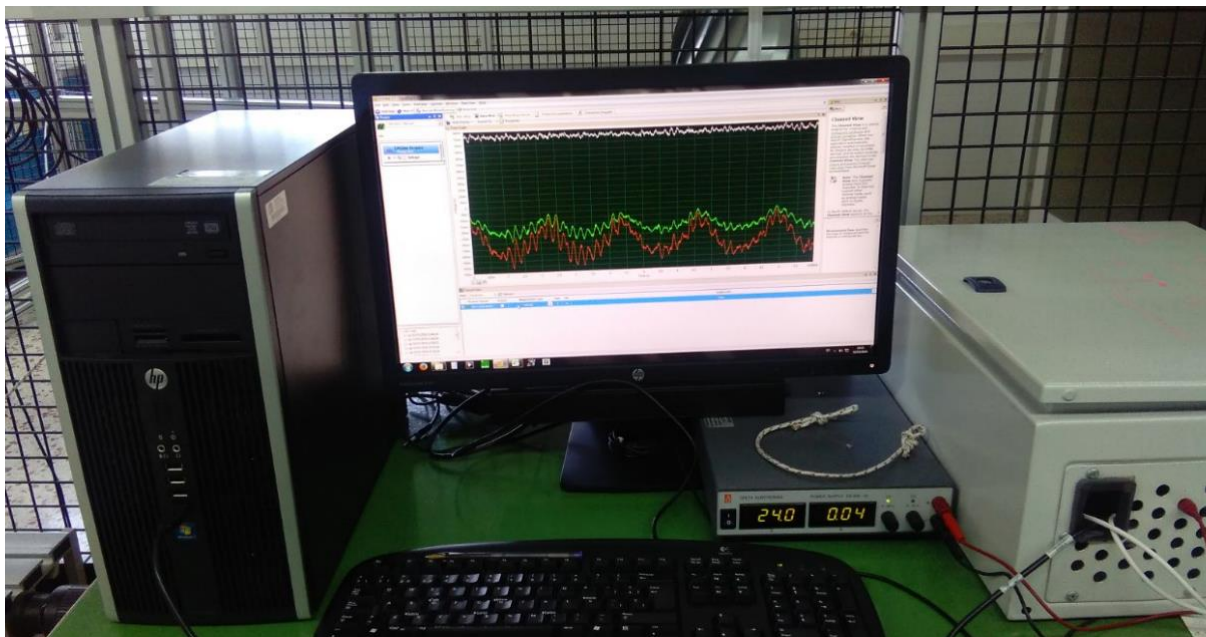


Figura 6.5: Señales obtenidas de la instalación instrumentada

6.2 Instrumentos utilizados para adquisición de datos

En el presente punto se detallaran las principales características de los instrumentos empleados:

6.2.1 Células de carga Burster 8523

Tension-Compression Load Cell Modelo 8523 del fabricante Burster. Esta célula de carga, con galgas extensométricas conectadas en puente completo, permite medir hasta 20N de fuerza axial (tensión-compresión) cuyo valor en tensión corresponde a 5V. Como indica el fabricante, este sensor se emplea en mediciones en estático o semi-estático siendo este el uso que se le da en el ensayo. Por otro lado, se detalla que el valor característico del sensor es estandarizado por lo que hace posible reemplazar el amplificador sin necesidad de ajustarlo.

6.2.2 Amplificador multicanal Burster 9235

Este amplificador se excita a un valor de tensión de 2,5V generando una corriente de excitación de 10mA max, valores en los que se genera una excitación estable para suministrar al sensor.

6.2.3 Transductor de presión SETRA 239

Transductor de baja presión diferencial Setra modelo 239, excitado a 24V (mediante la fuente de tensión). En este caso, puesto que no disponíamos de un calibrado donde se vinculase la velocidad del viento frente al output del transductor se realizó, empleando los parámetros de velocidad de viento proporcionados por el túnel de Viento (ver punto 6.2.5), el calibrado del conjunto pitot-transductor para obtener los valores de tensión directamente a velocidad del viento en m/s obteniendo la tabla 6.1 y la Figura 6.6:

Tabla 6.1: Calibrado Pitot vs velocidad viento

Frecuencia motor Túnel (Hz)	Velocidad Viento (m/s)	Output Pitot (V)
7,5	5	0,0332
9	6	0,0856
10	6,8	0,1348
11	7,4	0,1588
12,5	8,4	0,2112
13	8,8	0,2321
14	9,6	0,2739
15	10,4	0,2991
16	11	0,3472
17	11,6	0,3786
18	12,4	0,4298

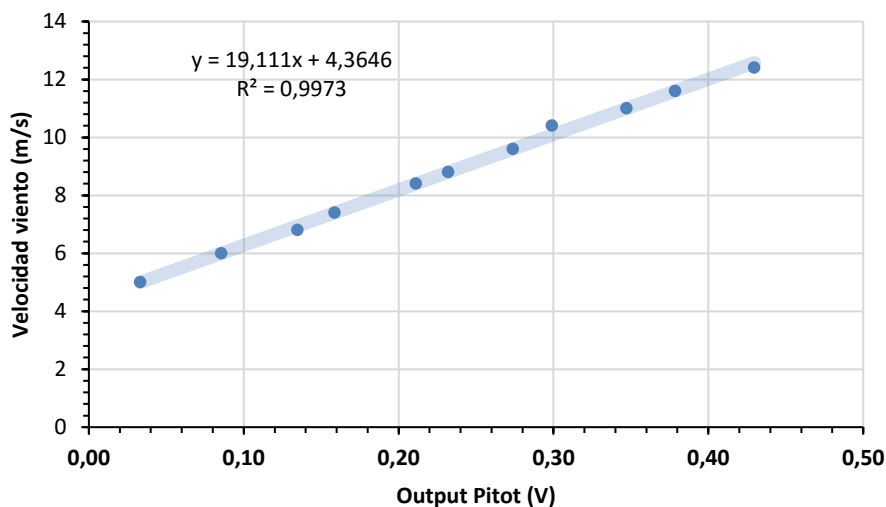


Figura 6.6: Recta de calibrado Pitot VS Velocidad viento (Volt VS m/s)

6.2.4 DAQ National Instruments USB-6009

Modelo de DAQ USB-6009 de National Instruments. La principal función será la de convertir la señal a un formato digital, que pueda ser leído por el software de PC y posteriormente tratada. Las características de las entradas al DAQ son las siguientes:

- Número de señales: 3
- Tipo de señales: Analógicas
- Tipo de excitación: Corriente continua (DC)
- Tensión de excitación: 5V

Con estas características y las prestaciones que ofrece el modelo serían suficientes para realizar el muestreo de las señales, tanto de la velocidad del viento como de las células de carga. Este modelo USB-6009 cuenta con las características principales siguientes:

- Medición: Voltaje/Digital
- Canales de entrada: 8
- Medición simultánea: No, multiplexado.
- Canales diferenciales: 4
- Máximo rate de lectura analógica: 48kS/s
- Tipo de conversor: aproximaciones sucesivas
- Rango de entrada/salida: +/- 5V
- Resolución convertidor: 14 bits

La tarjeta de adquisición será la encargada de convertir los datos analógicos proporcionados por el sistema sensor, a digital, para su almacenamiento y tratamiento. Se puede observar la tarjeta de DAQ en la Figura 6.7.



Figura 6.7: Tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6009

6.2.5 Túnel de viento 4-Winds OJWT

El túnel de viento empleado corresponde al instalado en el Laboratorio 203 de Mecánica de Fluidos de la Universitat Rovira i Virgili.

Este túnel es de ciclo abierto, donde un conjunto de cuatro ventiladores succionan aire del exterior y lo impulsan al interior del túnel, lugar donde debido a su construcción se acelera el movimiento del aire y finalmente sale al exterior con unos parámetros de uniformidad y velocidad del aire controlados a una distancia de 1,00m de la boca de salida. En este punto donde se conoce la velocidad a la que el aire es impulsado es donde se instala el extractor para ser ensayado.

Los parámetros y características del túnel se establecen en el reporte "*Flow and Turbulence Analysis of 4-Winds Open Jet Tunnel*" [7] elaborada por el grupo de investigación ECOMMFIT de la Universitat Rovira i Virgili, y han sido facilitados por el tutor del proyecto. En la Figura 6.8 se indican las dimensiones del túnel empleado.

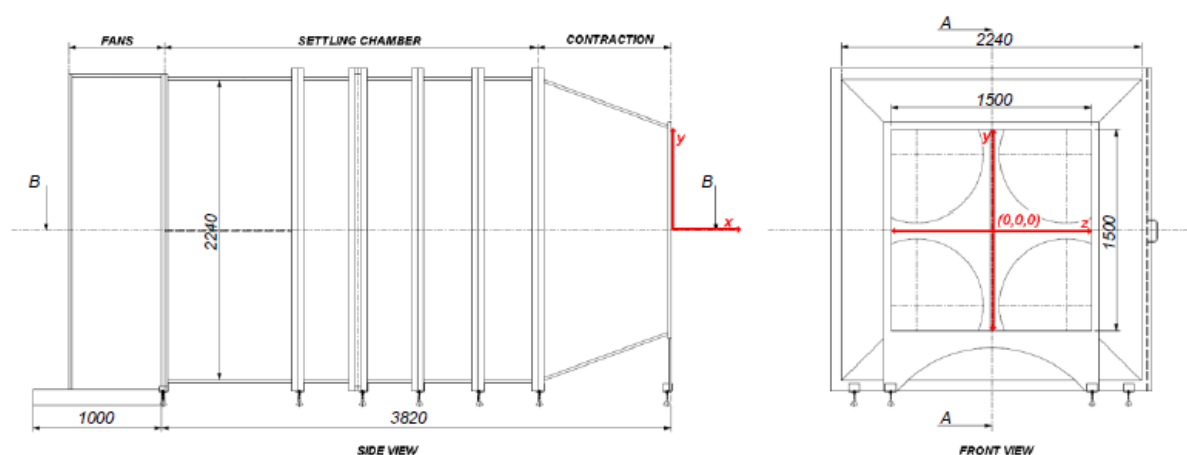


Figura 6.8: Vista lateral y frontal del 4-Winds OJWT (dimensiones en mm) [7]

La forma en la que se realiza la regulación de la cantidad de viento es controlando la frecuencia de giro de los motores de los ventiladores. En el documento anteriormente indicado, se establece la recta de calibrado del túnel donde permite conocer la velocidad del viento en función de la frecuencia de giro de los motores de los ventiladores. Esta recta de calibrado se indica en la Figura 6.9.

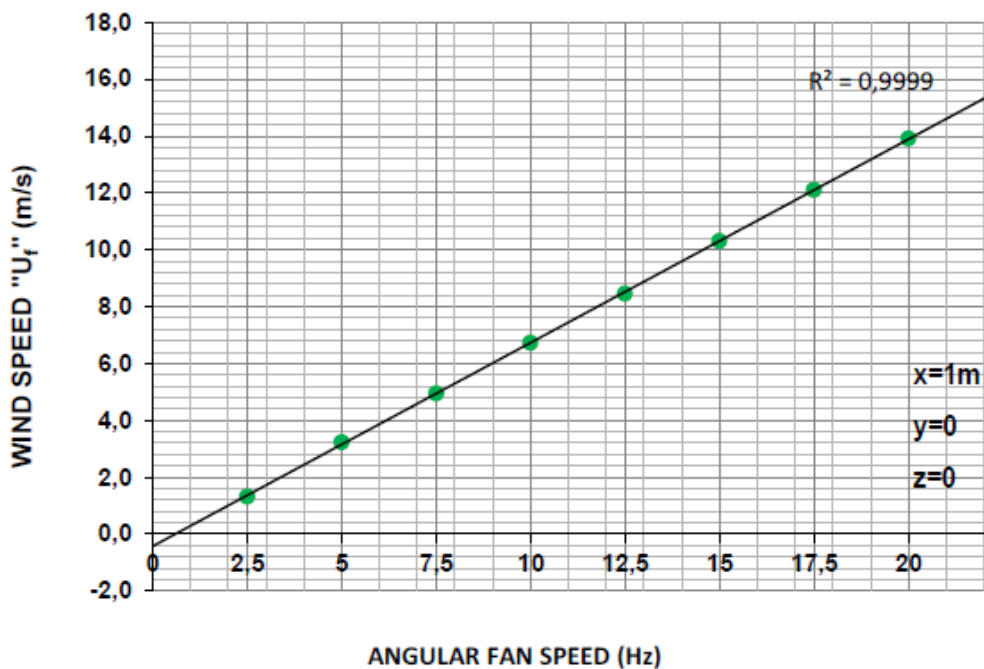


Figura 6.9: Velocidad del aire a 1,00m de la salida del túnel en función de la frecuencia de giro de los motores de los ventiladores [7]

Como dato final referente a los parámetros del túnel de viento que se requieren, en este ensayo, es la uniformidad del perfil de velocidades a la salida de la boca del túnel. El perfil de velocidades a lo largo del eje "y" del túnel (ver Figura 6.8) se detalla en la Figura 6.10.

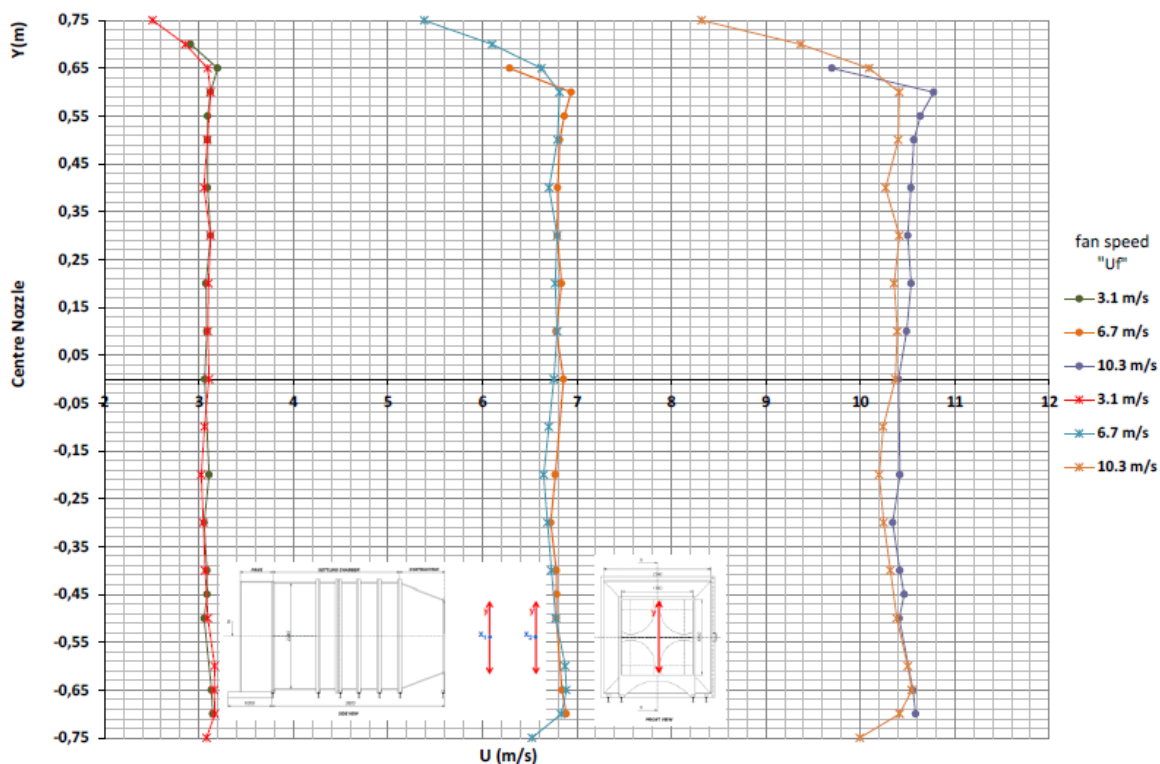


Figura 6.10: Perfil de velocidades a $x=1,00m$ (símbolos circulares) y a $x=2,00m$ (símbolos en estrella) [7]

6.3 Software empleado

Para la realización del ensayo y obtención de los resultados referentes al extractor eólico ha sido necesario emplear diferentes tipos de herramientas informáticas para poder realizar tanto la parte de estimaciones de parámetros, como en la parte de muestreo y procesado de datos. Las herramientas empleadas y la función desempeñada se indican a continuación:

- **Minitab 16.1.0:** Análisis estadístico del potencial eólico de la zona próxima a la ubicación del promotor.
- **NI-LabVIEW 2013:** Software empleado en la realización del muestreo y toma de datos en el ensayo en laboratorio del extractor eólico.
- **Engineering Equation Solver 7.692:** Obtención de parámetros referentes a las propiedades del aire.
- **MatLAB 7.12:** Software empleado para el estudio, tratamiento y procesado de imágenes captadas en el análisis de la estela del extractor (ver punto 10).
- **Multicam Studio:** Software empleado para el muestreo y captación de imágenes empleadas en el análisis de la estela del extractor.
- **Microsoft Excel 2013:** cálculo y obtención de resultados referentes a las curvas de potencia del extractor eólico.
- **Microsoft Word 2013:** Edición de texto.

6.4 Elaboración de curvas de potencia

Como se ha indicado en el punto anterior, el tratamiento, procesado de datos y obtención de los resultados referentes a las curvas de potencia obtenidas del extractor eólico se ha realizado mediante hoja de cálculo. En el presente punto se detallará los pasos que se realiza en la hoja y posteriormente se indicará la relación de resultados obtenidos mediante este procedimiento.

Para empezar con los cálculos es necesario conocer el diámetro del extractor, este diámetro (D) corresponde a un valor de 0,33m justo en la parte más exterior de los alabes. Conocido el diámetro se procede al cálculo del área frontal del extractor mediante la Ec. 4.20, indicada en páginas anteriores, considerando que la geometría de dicha área se ajusta a un semicírculo resultando un valor de 0,0428m².

A continuación, se requiere de los parámetros de presión atmosférica y temperatura del aire para poder determinar su densidad. Este valor ha sido obtenido mediante el software "Engineering Equation Solver" (ver punto 6.3).

Posteriormente, se requiere de los valores de entrada obtenidos del muestreo una vez el equipo de medición y el túnel están preparados y en un régimen de funcionamiento estable. Estos parámetros corresponden a los valores en tensión (Volt) procedentes del tubo Pitot y transductor de presión y de las dos células de carga. Por otro lado, y de forma manual, se contabiliza el tiempo (s) que tarda el extractor en dar 10 vueltas completas a una fuerza de frenado aplicada.

Con estos datos podemos calcular los siguientes parámetros:

- La velocidad angular del extractor, tal como se indica en la Ec.6.1:

$$\omega = \frac{n}{t} \cdot 2\pi \quad (\text{Ec.6.1})$$

Siendo:

ω : velocidad angular del extractor (rad/s)

n= número de vueltas completas, en nuestro caso 10 vueltas.

t= tiempo en dar las 10 vueltas completas (s)

- Velocidad del aire (m/s) incidente en el extractor, empleando la recta de calibración indicada en el punto 6.2.3.
- El par en el eje de giro del extractor, donde conociendo los datos de salida de las células de carga (20N-5V) y previa comprobación de la linealidad de los mismos, y las distancias en la que se aplican las fuerzas de frenado, se establece la Ec.6.2.

$$T = \frac{|(C_1 - C_2)| \cdot 4 \cdot D}{2} \quad (\text{Ec.6.2})$$

Siendo:

T: el par en el eje del extractor (N.m)

C₁ y C₂: output de cada célula de carga (Volt)

D: diámetro considerado del extractor (m)

Finalmente podemos calcular el valor del Coeficiente de Potencia (CP) y el Tip Speed Ratio (λ) a partir de la Ec. 6.3 y 6.4, respectivamente:

$$CP = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_F \cdot v^3} \quad (\text{Ec.6.3})$$

Donde:

T: Par en el eje de giro del extractor (N.m)

ω : velocidad angular del extractor (rad/s)

ρ : densidad del aire (kg/m³)

A_F: área frontal barrida por el extractor

v: velocidad del viento (m/s)

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad (\text{Ec.6.4})$$

Siendo:

ω : velocidad angular del extractor (rad/s)

v: velocidad del viento (m/s)

r: radio del extractor (m)

Para obtener una curva de potencia se mantiene la velocidad del viento constante y se realiza el muestreo de datos a una fuerza de frenado aplicada, donde posteriormente, se aumenta dicha fuerza de frenado para realizar de nuevo la medición. Este procedimiento se realiza a lo largo de todo un ciclo de trabajo, desde posición de extractor libre a extractor detenido. Llegado este punto, se modifica la velocidad del viento para obtener una nueva curva de potencia.

En nuestro caso se ha procedido desde un régimen de funcionamiento en vacío (sin fuerza de frenado) hasta un régimen donde se aplica la fuerza de frenado máxima, donde el extractor se detiene. No obstante, se ha verificado que los resultados no sufren variaciones significativas realizando el procedimiento de forma inversa (partiendo del extractor parado hasta que queda totalmente libre), reduciendo la fuerza de frenado.

Además de esto, los ensayos no se han realizado aumentando progresivamente la velocidad de viento y de forma ordenada a medida que se van obteniendo las curvas, sino que se han realizado de forma aleatoria; partiendo de la velocidad de viento baja y siguiendo con la máxima que ofrece el túnel, y así progresivamente, junto con la realización de estas en jornadas de trabajo diferentes, con la finalidad de analizar y verificar la repetitividad del ensayo.

En referencia a la fuerza de frenado aplicada, como se indicó en el punto 6.1, se ha empleado la mesa portaherramientas donde se aplicaba una fuerza correspondiente a 0,5mm de avance del nonio. Este punto no es significativo a lo que implica a la repetitividad del ensayo, puesto que la fuerza de frenado (al final con el Par) y la velocidad angular del extractor están relacionadas mediante la CP y TSR, por lo que a pesar de muestrear puntos de la curva diferentes aplicando una fuerza de frenado distinta, la curva final obtenida no debería verse alterada.

6.5 Plan de recolección y procesado de datos

Para la obtención de un punto de cada curva de potencia, se ha realizado el muestreo de la experimentación a 500Hz obteniendo 5000 muestras, con lo que una vez el régimen se había estabilizado al variar la fuerza de frenado (aprox. 30s), obteníamos 5000 muestras en 10 segundos.

Se decidió optar por un muestreo elevado de datos por cada punto, debido a que el giro del extractor era ligeramente irregular y resultaría muy osado el tomar mediciones puntuales. En la Figura 6.11 se puede observar el muestreo referente a un punto de una curva de potencia.

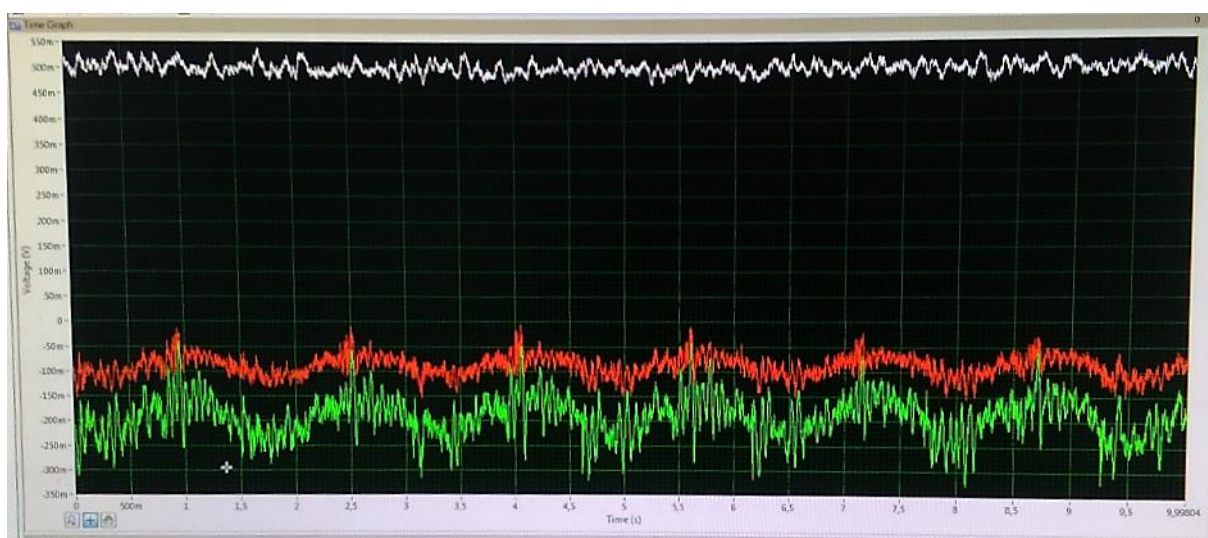


Figura 6.11: Muestreo de un punto 5k samples 500Hz (*Interface: NI-LabVIEW*)

De todos estos valores muestreados, se realizaba el promedio de las 5000 muestras con lo que obteníamos un valor para cada parámetro medido, correspondiente a los valores en Volt de las dos células de carga y la velocidad del aire. Con ello, y con los pasos indicados en el punto anterior, podemos calcular un punto de la curva de potencia. Consecuentemente, se modifica la fuerza de frenado hasta completar el muestreo de puntos de la curva.

7 Curvas de potencia del extractor comercial

Una vez detallado el procedimiento que se ha realizado en cada experimentación en los puntos anteriores, se procederá a la representación de los resultados obtenidos una vez realizados los ensayos y obtenidas las diferentes curvas de potencia. En el presente punto se detallaran los resultados referentes al *extractor comercial*, el cual corresponde al propio extractor facilitado por el promotor, instalado directamente en el área de ensayo del túnel de viento.

Es necesario añadir que en estas curvas se ha empleado una densidad del aire de 1,175 kg/m³ correspondientes a 1009 hPa y 26°C.

7.1 Curva de potencia a 9,60 m/s (Túnel 15Hz)

Tabla 7.1: Resultados curva de potencia extractor comercial a 9,60 m/s de viento (Túnel 15Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,27701	-0,06586	-0,13269	32,06	10	1,96	18,72	9,66	0,2673	0,0441	0,0038	0,0335
2	0,27672	-0,06608	-0,13211	32,14	10	1,95	18,67	9,65	0,2641	0,0436	0,0038	0,0334
3	0,27755	-0,06791	-0,13477	33,82	10	1,86	17,74	9,67	0,2674	0,0441	0,0036	0,0317
4	0,27864	-0,06938	-0,13663	34,29	10	1,83	17,50	9,69	0,2690	0,0444	0,0036	0,0312
5	0,27732	-0,07034	-0,13833	39,19	10	1,60	15,31	9,66	0,2720	0,0449	0,0032	0,0274
6	0,27531	-0,07282	-0,14017	43,11	10	1,46	13,92	9,63	0,2694	0,0445	0,0029	0,0250
7	0,27705	-0,08278	-0,15625	60,40	10	1,04	9,93	9,66	0,2939	0,0485	0,0022	0,0178
8	0,27691	-0,08884	-0,16275	83,36	10	0,75	7,20	9,66	0,2957	0,0488	0,0016	0,0129

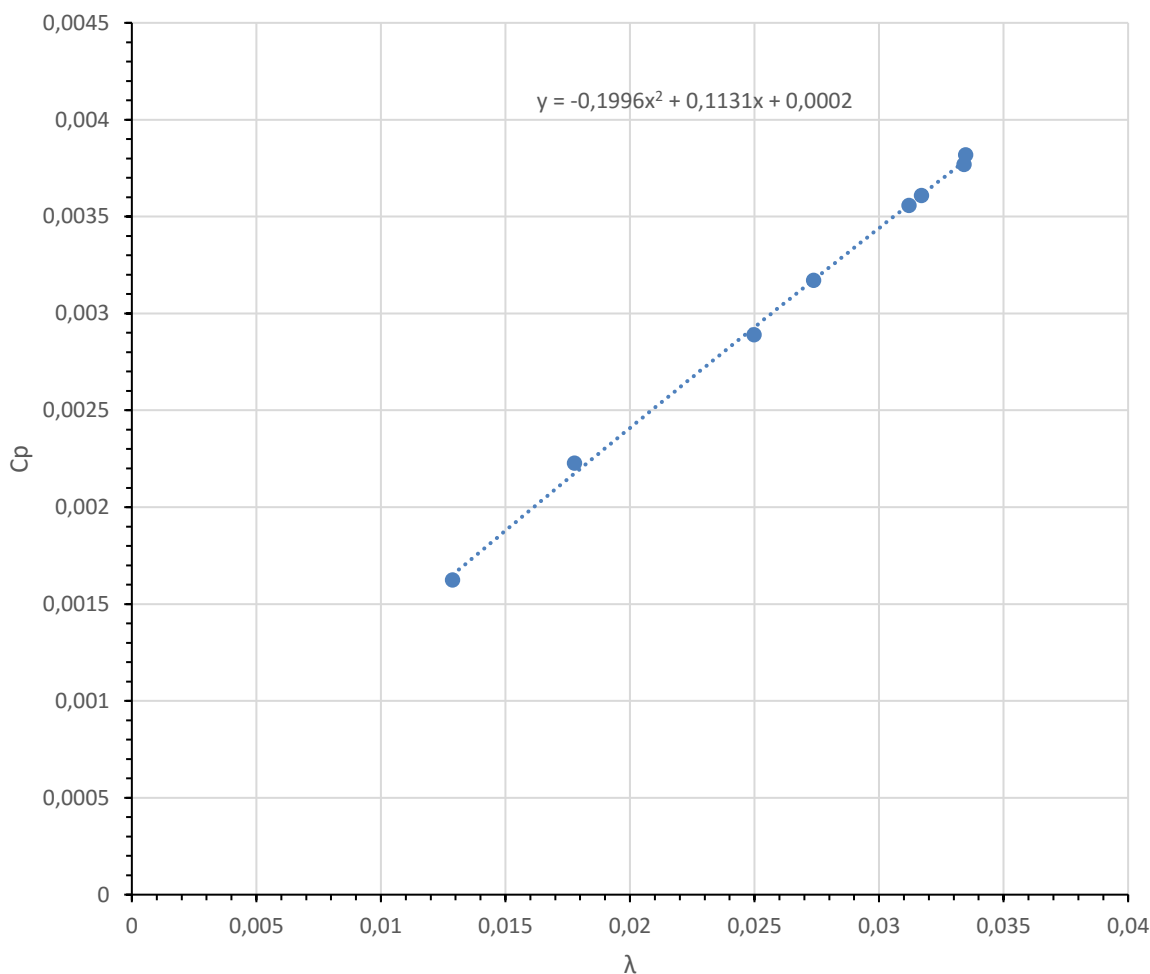


Figura 7.1: Curva de potencia experimental extractor comercial a 9,70 m/s (Túnel 15Hz)

7.2 Curva de potencia a 10,40 m/s (Túnel 16Hz)

Tabla 7.2: Resultados curva de potencia extractor comercial a 10,40 m/s de viento (Túnel16Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,31600	-0,06538	-0,14021	21,92	10	2,87	27,37	10,40	0,2993	0,0494	0,0050	0,0455
2	0,31691	-0,06555	-0,14020	22,05	10	2,85	27,21	10,42	0,2986	0,0493	0,0049	0,0451
3	0,31576	-0,06671	-0,14128	23,57	10	2,67	25,45	10,40	0,2983	0,0492	0,0046	0,0423
4	0,31562	-0,06834	-0,14346	23,85	10	2,63	25,16	10,40	0,3005	0,0496	0,0046	0,0418
5	0,31761	-0,06997	-0,14673	25,39	10	2,47	23,63	10,43	0,3071	0,0507	0,0044	0,0391
6	0,31608	-0,07467	-0,15333	28,73	10	2,19	20,89	10,41	0,3147	0,0519	0,0040	0,0347
7	0,31747	-0,07924	-0,15912	36,29	10	1,73	16,53	10,43	0,3195	0,0527	0,0032	0,0274
8	0,31437	-0,08623	-0,16654	46,79	10	1,34	12,82	10,37	0,3212	0,0530	0,0025	0,0214
9	0,31602	-0,09466	-0,18009	58,59	10	1,07	10,24	10,40	0,3417	0,0564	0,0021	0,0170

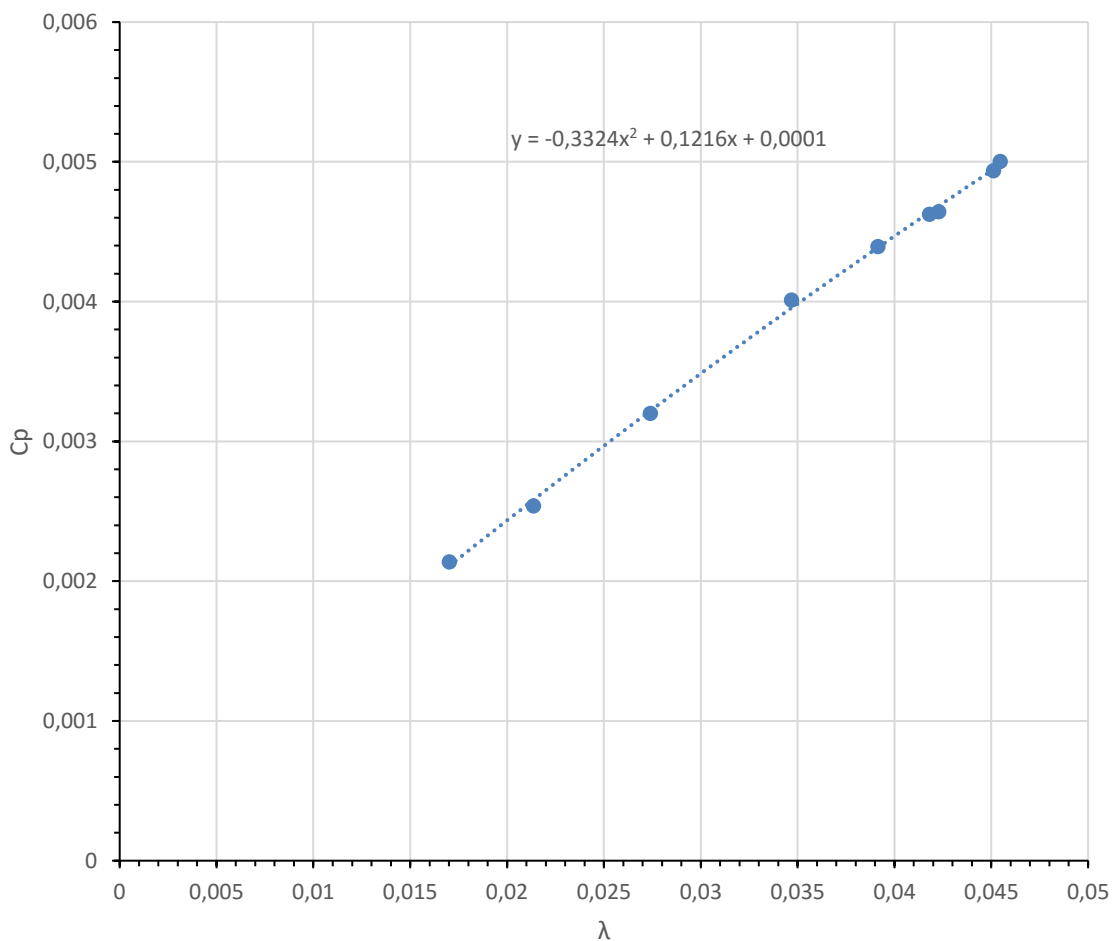


Figura 7.2: Curva de potencia experimental extractor comercial a 10,40 m/s de viento (Túnel 16Hz)

7.3 Curva de potencia a 11 m/s (Túnel 17Hz)

Tabla 7.3: Resultados curva de potencia extractor comercial a 11 m/s de viento (Túnel 17Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,35822	-0,06414	-0,14438	14,95	10	4,20	40,14	11,21	0,3209	0,0530	0,0063	0,0619
2	0,35621	-0,06479	-0,14495	15,16	10	4,14	39,58	11,17	0,3206	0,0529	0,0063	0,0612
3	0,35769	-0,06961	-0,15320	17,46	10	3,60	34,36	11,20	0,3343	0,0552	0,0056	0,0530
4	0,35710	-0,07040	-0,15368	18,04	10	3,48	33,26	11,19	0,3331	0,0550	0,0054	0,0514
5	0,35855	-0,07053	-0,15384	17,93	10	3,50	33,46	11,22	0,3332	0,0550	0,0054	0,0515
6	0,35751	-0,07382	-0,16110	20,82	10	3,02	28,82	11,20	0,3491	0,0576	0,0049	0,0445
7	0,35809	-0,08041	-0,16885	25,17	10	2,50	23,83	11,21	0,3538	0,0584	0,0041	0,0367
8	0,35707	-0,08327	-0,17182	27,95	10	2,25	21,46	11,19	0,3542	0,0584	0,0037	0,0331
9	0,35737	-0,08988	-0,18236	34,71	10	1,81	17,28	11,19	0,3699	0,0610	0,0031	0,0267
10	0,35708	-0,09748	-0,19174	42,30	10	1,49	14,18	11,19	0,3771	0,0622	0,0026	0,0219
11	0,35821	-0,10998	-0,20774	65,49	10	0,96	9,16	11,21	0,3910	0,0645	0,0017	0,0141

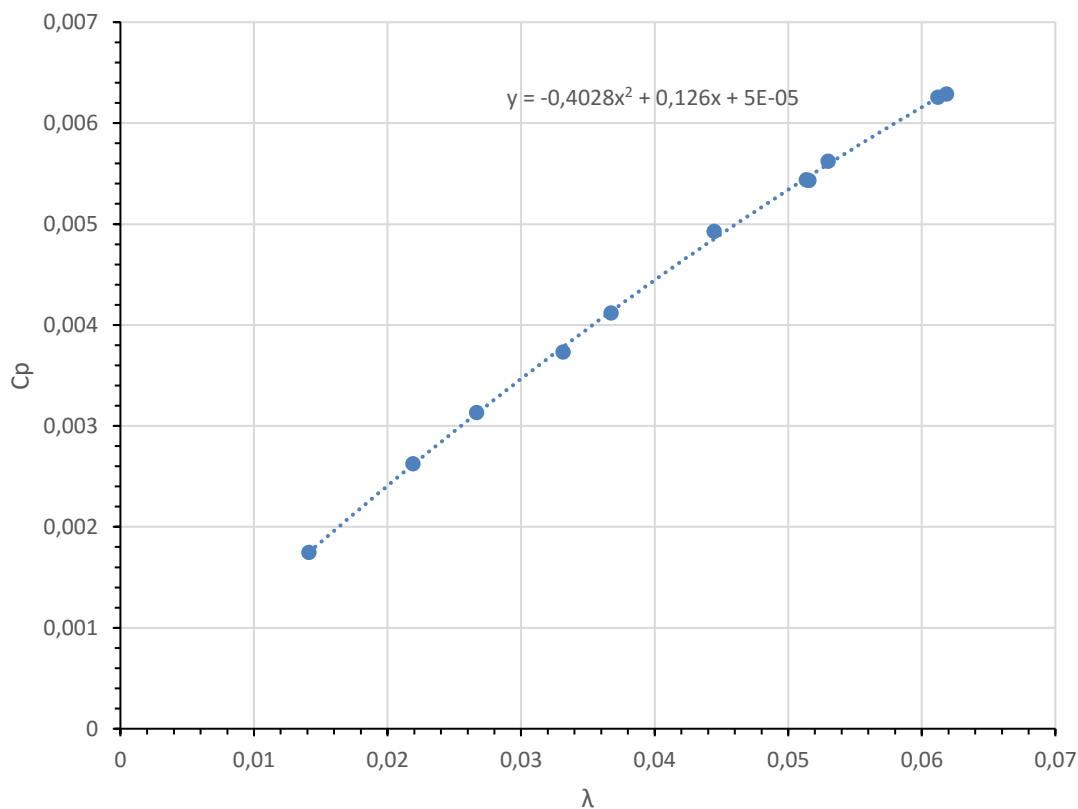


Figura 7.3: Curva de potencia experimental extractor comercial a 11 m/s de viento (Túnel 17Hz)

7.4 Curva de potencia a 11,80 m/s (Túnel 18Hz)

Tabla 7.4: Resultados curva de potencia extractor comercial a 11,80 m/s de viento (Túnel18Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,39871	-0,06316	-0,14084	10,14	10	6,19	59,15	11,98	0,3107	0,0513	0,0073	0,0853
2	0,40068	-0,06353	-0,14283	10,35	10	6,07	57,99	12,02	0,3172	0,0523	0,0073	0,0833
3	0,40182	-0,06449	-0,14643	10,72	10	5,86	55,97	12,04	0,3277	0,0541	0,0072	0,0803
4	0,40032	-0,06470	-0,14760	10,90	10	5,76	55,05	12,02	0,3316	0,0547	0,0072	0,0792
5	0,39917	-0,06636	-0,14983	11,56	10	5,43	51,89	11,99	0,3339	0,0551	0,0069	0,0748
6	0,40011	-0,06851	-0,15424	12,44	10	5,05	48,22	12,01	0,3430	0,0566	0,0066	0,0694
7	0,40070	-0,07237	-0,15976	13,81	10	4,55	43,46	12,02	0,3496	0,0577	0,0060	0,0625
8	0,40256	-0,07575	-0,16807	15,17	10	4,14	39,56	12,06	0,3693	0,0609	0,0057	0,0567
9	0,40008	-0,07989	-0,17405	17,24	10	3,64	34,80	12,01	0,3766	0,0621	0,0052	0,0501
10	0,40357	-0,08892	-0,18882	22,84	10	2,75	26,27	12,08	0,3996	0,0659	0,0041	0,0376
11	0,40199	-0,09610	-0,19602	28,06	10	2,24	21,39	12,05	0,3997	0,0659	0,0034	0,0307
12	0,39958	-0,10836	-0,21187	37,21	10	1,69	16,12	12,00	0,4141	0,0683	0,0027	0,0232

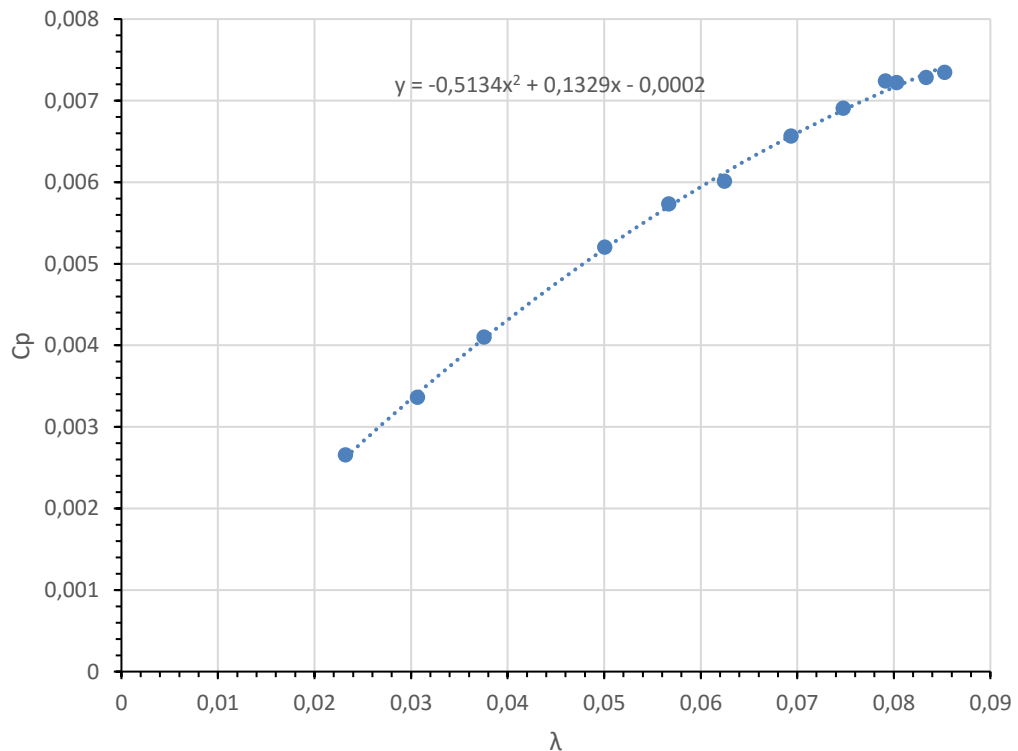


Figura 7.4: Curva de potencia experimental extractor comercial a 11,80 m/s de viento (Túnel 18Hz)

7.5 Curva de potencia a 13 m/s (Túnel 19Hz)

Tabla 7.5: Resultados curva de potencia extractor comercial a 13 m/s de viento (Túnel 19Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,44950	-0,06465	-0,14834	8,27	10	7,59	72,52	12,96	0,3348	0,0552	0,0077	0,0967
2	0,44858	-0,06508	-0,15071	8,56	10	7,34	70,09	12,94	0,3425	0,0565	0,0076	0,0936
3	0,44901	-0,06485	-0,15323	8,92	10	7,04	67,24	12,95	0,3535	0,0583	0,0075	0,0897
4	0,44811	-0,06570	-0,15543	9,06	10	6,94	66,23	12,93	0,3589	0,0592	0,0076	0,0885
5	0,45007	-0,06811	-0,16038	9,70	10	6,48	61,86	12,97	0,3691	0,0609	0,0072	0,0824
6	0,45189	-0,06926	-0,16443	10,06	10	6,25	59,64	13,00	0,3807	0,0628	0,0071	0,0793
7	0,44862	-0,07194	-0,16921	10,68	10	5,88	56,16	12,94	0,3891	0,0642	0,0069	0,0750
8	0,45034	-0,07379	-0,17243	11,47	10	5,48	52,31	12,97	0,3945	0,0651	0,0065	0,0697
9	0,45026	-0,07550	-0,17744	11,98	10	5,25	50,10	12,97	0,4078	0,0673	0,0064	0,0667
10	0,44955	-0,07862	-0,18220	12,89	10	4,87	46,55	12,96	0,4143	0,0684	0,0061	0,0621
11	0,44819	-0,07989	-0,18563	13,67	10	4,60	43,88	12,93	0,4230	0,0698	0,0059	0,0586
12	0,44977	-0,08290	-0,18985	14,58	10	4,31	41,15	12,96	0,4278	0,0706	0,0056	0,0549
13	0,45189	-0,08671	-0,19755	16,85	10	3,73	35,61	13,00	0,4434	0,0732	0,0049	0,0473
14	0,44788	-0,08391	-0,19245	16,16	10	3,89	37,13	12,92	0,4342	0,0716	0,0051	0,0496
15	0,45046	-0,10719	-0,22855	29,68	10	2,12	20,22	12,97	0,4854	0,0801	0,0031	0,0269
16	0,44849	-0,11080	-0,23022	32,45	10	1,94	18,49	12,94	0,4777	0,0788	0,0028	0,0247
17	0,45075	-0,11363	-0,23350	33,62	10	1,87	17,85	12,98	0,4795	0,0791	0,0027	0,0238

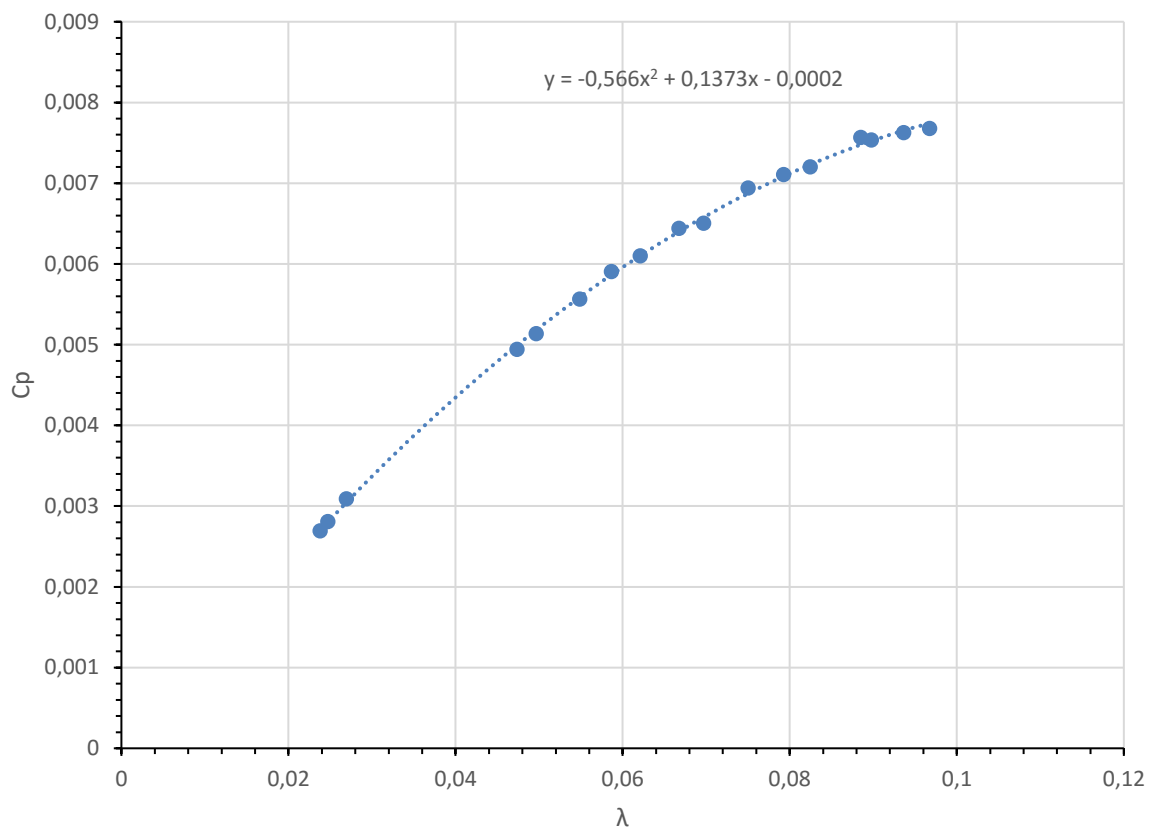


Figura 7.5: Curva de potencia experimental extractor comercial a 12,50 m/s de viento (Túnel 19Hz)

7.6 Conjunto curvas de potencia experimentales extractor comercial

En el presente punto se representan las anteriores curvas de potencia obtenidas en un mismo gráfico de dispersión. Esto permite establecer una comparación entre dichas curvas de forma más intuitiva y, además, permite conocer la "ubicación" donde se encontraría el extractor comercial respecto a otros tipos de generadores convencionales. Este conjunto de curvas se representa en la Figura 7.6.

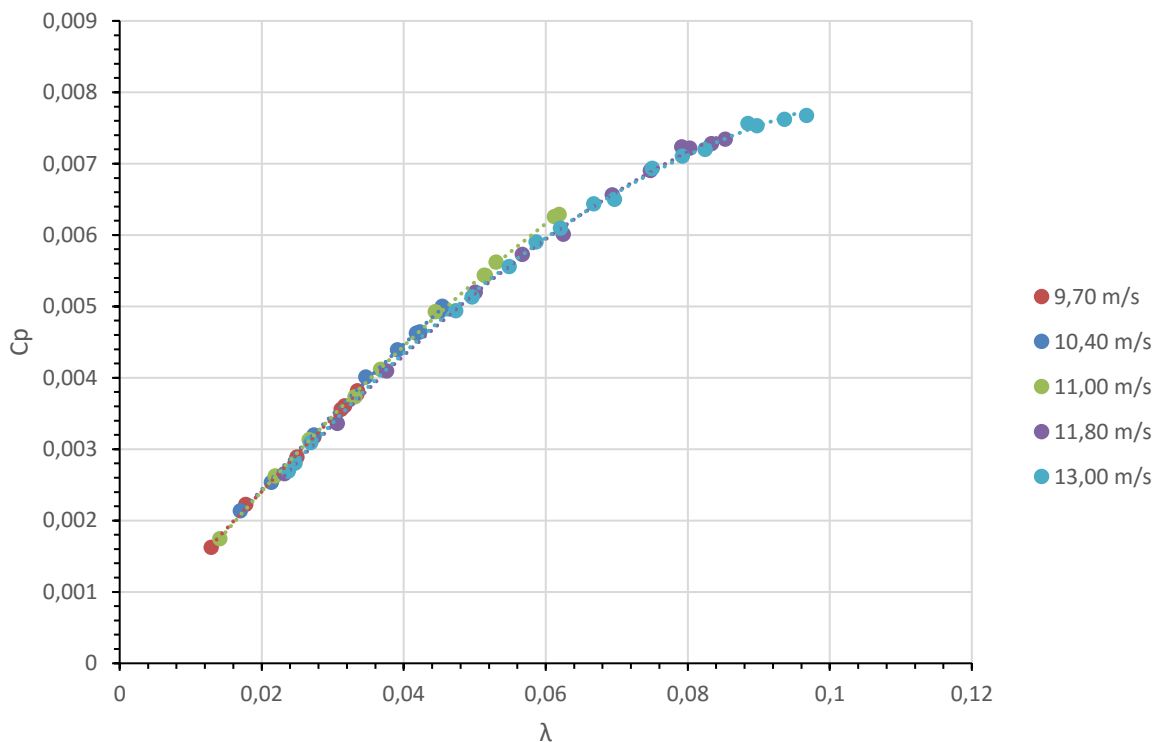


Figura 7.6: Conjunto de curvas de potencia del extractor comercial a diferentes velocidades de viento

7.7 Conclusiones eficiencia energética extractor comercial

Si observamos especialmente la figura anterior 7.6, podemos comprobar que las curvas de potencia obtenidas en el extractor comercial se encuentran muy próximas entre sí, por lo que se puede plantear la hipótesis de interpretar todas estas curvas como una sola de forma que se puede obtener el comportamiento del extractor dentro del rango de 9,7 a 13 m/s.

No obstante, y como era de esperar según lo comentado en el punto 3.3 sobre los condicionantes del extractor, la capacidad de extracción de energía eólica y convertirla a mecánica del extractor es muy reducida. Si observamos la siguiente figura, podemos conocer la situación aproximada donde encontraría el extractor comercial respecto otras tipologías de generadores convencionales (situación establecida s./ escala del dibujo).

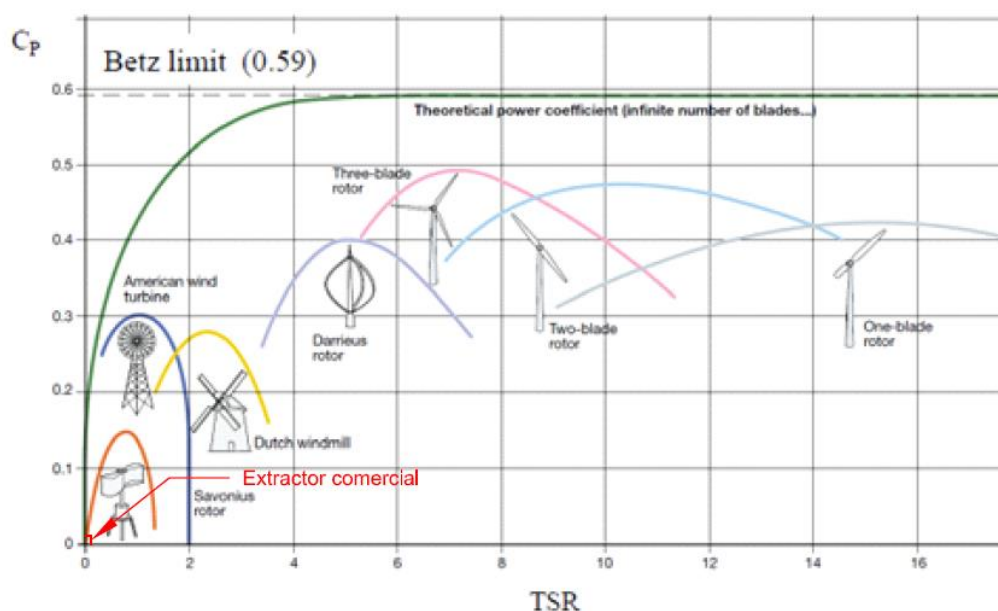


Figura 7.7: Comparativa extractor comercial respecto tipologías generadores convencionales

Sin embargo, esto no significa que la posibilidad de usar los extractores como generadores eléctricos quede descartada, puesto que la viabilidad del proyecto debería quedar definida por la cantidad de energía generada (aunque sea poca) frente a los costes que implica la modificación de los extractores a generadores, mantenimiento de los equipos y el tiempo de amortización de la instalación; y que la cantidad de energía generada sea suficiente para poder ser utilizada en otros sistemas.

Por otro lado añadir que, como se puede observar en los resultados de "Fuerza Equivalente" en las tablas de las curvas de potencia, el extractor tiene una gran sensibilidad frente a los cambios por lo que con ligeros cambios de fuerza aplicada como freno se pasa de un funcionamiento de régimen en vacío a un régimen de plena carga trabajando habitualmente en un rango de par entre 5 y 7 gramos por metro. Además, el ensayo se ha podido realizar a partir de 15Hz de túnel (aprox. 10 m/s) donde estas rachas y superiores empiezan a ser poco habituales en la situación (Complex Educatiu de Tarragona) donde disponemos de los datos de viento fiables.

En penúltimo lugar, si se puede observar la tendencia del comportamiento a una curva, donde en el caso de la dirección del ensayo (libre a máxima carga) empezamos con la máxima velocidad angular del rotor respecto la velocidad del aire y mínima fuerza de frenado; consecuentemente, esta va bajando a medida que aumentamos la carga resistiva progresivamente (aumento de par, bajada de velocidad angular) hasta que finalmente el valor de CP y TSR tienden a cero a medida que el extractor se detiene ($\omega \approx 0$).

Finalmente y debido a lo expuesto en los anteriores párrafos, con simplemente situar el cableado que realizará de freno del extractor (fuerza mínima), nos encontramos que ya se ha sobrepasado el punto máximo de las curvas de potencia y nos encontramos siempre en el lado de bajada de la curva (nótese que la dirección en la que se ha generado la curva es de derecha a izquierda del gráfico).

8 Alternativas de modificación

8.1 Justificación de la modificación seleccionada

Por los motivos expuestos en el punto 7.7, se tratará de modificar el extractor comercial asimilándolo a un comportamiento de un generador eólico del tipo *Darrieus* donde no suponga un incremento de coste elevado y permita un aumento del aprovechamiento energético de los extractores comerciales.

Esta tipología de aerogeneradores funcionan mediante el principio básico de las fuerzas sustentación, explicadas en el marco teórico en el punto 4.3.4, generadas en las palas debido al diferencial de presión que se genera en su superficie. Esta tipología de generadores presenta el más alto rendimiento a lo que respecta a los generadores de eje vertical y como principal ventaja es que no necesita de un mecanismo de orientación para girar el rotor en contra del viento. Por el contrario, estas máquinas no son de arranque automático, es decir, una máquina Darrieus necesita de un "empuje" antes de arrancar. No obstante, al disponer de los álabes del propio extractor, se espera que esta carencia que presenta la tipología Darrieus frente al arranque se vea compensada por la geometría de los álabes del extractor, y sean estos los que ayuden en el momento del arranque.

Para realizar la modificación, se han instalado dos alas en el propio extractor de tipo simétrico siendo el perfil de ala del tipo NACA-0014. El significado de la nomenclatura de los perfiles NACA-4 cifras corresponde:

- La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en %, proporcionando la máxima curvatura.
- La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura.
- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo del perfil en % respecto a la cuerda.
- El perfil se obtiene mediante dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media.

En la figura 8.1 se pueden ver dos ejemplos referentes a perfiles NACA-4Cifras a lo que se refiere a su nomenclatura y significado.

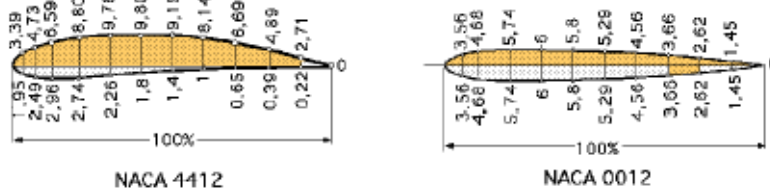


Figura 8.1: Ejemplo significado de la nomenclatura NACA de 4 cifras [8]

Entonces, en el caso que nos ocupa, el perfil de ala NACA-0014 tiene un 0% de altura máxima de la línea media, situada a un 0% del borde de ataque y con un espesor relativo del 14%.

En siguiente lugar, siguiendo los resultados de los estudios [9] y [10] dirigidos por el profesor de aerodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sheffield, Ning Qin, se establece que en este tipo de aerogeneradores presentan mayor rendimiento con 2 palas y se observa que a un mayor número de palas, la estela de estas provoca interferencias entre ellas y conllevando una reducción del rendimiento.

En la modificación realizada, la distancia entre las alas es de 750mm y a una distancia equidistante del eje del extractor, siendo de 375mm y tienen una longitud total de 922mm. En la Figura 8.2 se puede observar el extractor modificado.



Figura 8.2: Extractor modificado con perfiles de ala NACA-0014

Añadir que la separación entre las palas venia limitada por el área máxima de la boca de salida del túnel y, la longitud de ellas, por la necesidad de permitir el giro del extractor y evitar la colisión con el mecanismo de frenado. Por otro lado, si se quería aumentar la longitud de las palas en la parte superior del extractor, esta implicaba un montaje más complejo o bien se generaban inestabilidades en ellas al ser un perfil más esbelto sin arrostramiento.

9 Análisis del extractor modificado

En el presente punto se detallaran los resultados referentes al extractor donde se le han acoplado los perfiles de ala NACA-0014, donde a partir de ahora, nos referiremos a él como *extractor modificado*.

En estas curvas se ha empleado una densidad del aire de $1,175 \text{ kg/m}^3$ correspondientes a 1009 hPa y 26°C . Por otro lado, referente al área frontal barrida por el extractor modificado a pesar de haber incorporado los perfiles de ala, se ha continuado empleando el área del extractor comercial ($0,0428 \text{ m}^2$) con la finalidad de permitir la comparación frente al caso anterior y observar si realmente se mejora la eficiencia del nuevo equipo. Sin embargo, la velocidad angular en el extremo de la pala (numerador del TSR), si se ha considerado el radio entre el eje del rotor y el perfil de ala (375mm).

9.1 Curva de potencia a $9,60 \text{ m/s}$ (Túnel 15Hz)

Tabla 9.1: Resultados curva de potencia extractor modificado a $9,60 \text{ m/s}$ de viento (Túnel 15Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,26595	-0,06083	-0,09533	21,48	10	2,93	27,94	9,45	0,1380	0,0228	0,003145	0,1161
2	0,26617	-0,06165	-0,09651	21,93	10	2,87	27,36	9,45	0,1394	0,0230	0,003108	0,1137
3	0,26343	-0,06174	-0,09753	22,57	10	2,78	26,58	9,40	0,1432	0,0236	0,003152	0,1111
4	0,26397	-0,05981	-0,09929	23,71	10	2,65	25,31	9,41	0,1580	0,0261	0,003300	0,1056
5	0,26459	-0,05999	-0,09920	23,93	10	2,63	25,07	9,42	0,1568	0,0259	0,003233	0,1045
6	0,26384	-0,06381	-0,10458	24,88	10	2,53	24,12	9,41	0,1631	0,0269	0,003250	0,1007
7	0,26400	-0,06642	-0,10968	25,87	10	2,43	23,19	9,41	0,1731	0,0286	0,003313	0,0968
8	0,26306	-0,06894	-0,11313	26,90	10	2,34	22,31	9,39	0,1768	0,0292	0,003273	0,0933
9	0,26126	-0,07170	-0,11857	28,98	10	2,17	20,71	9,36	0,1875	0,0309	0,003258	0,0869
10	0,26262	-0,07150	-0,11765	29,59	10	2,12	20,28	9,38	0,1846	0,0305	0,003116	0,0849
11	0,26226	-0,07528	-0,12388	31,71	10	1,98	18,92	9,38	0,1944	0,0321	0,003069	0,0793
12	0,26436	-0,08156	-0,13348	35,48	10	1,77	16,91	9,42	0,2077	0,0343	0,002893	0,0705
13	0,26293	-0,08783	-0,14552	39,99	10	1,57	15,01	9,39	0,2308	0,0381	0,002877	0,0628
14	0,26485	-0,08842	-0,14715	44,21	10	1,42	13,57	9,43	0,2349	0,0388	0,002618	0,0565
15	0,26495	-0,08939	-0,14925	45,65	10	1,38	13,14	9,43	0,2394	0,0395	0,002582	0,0547

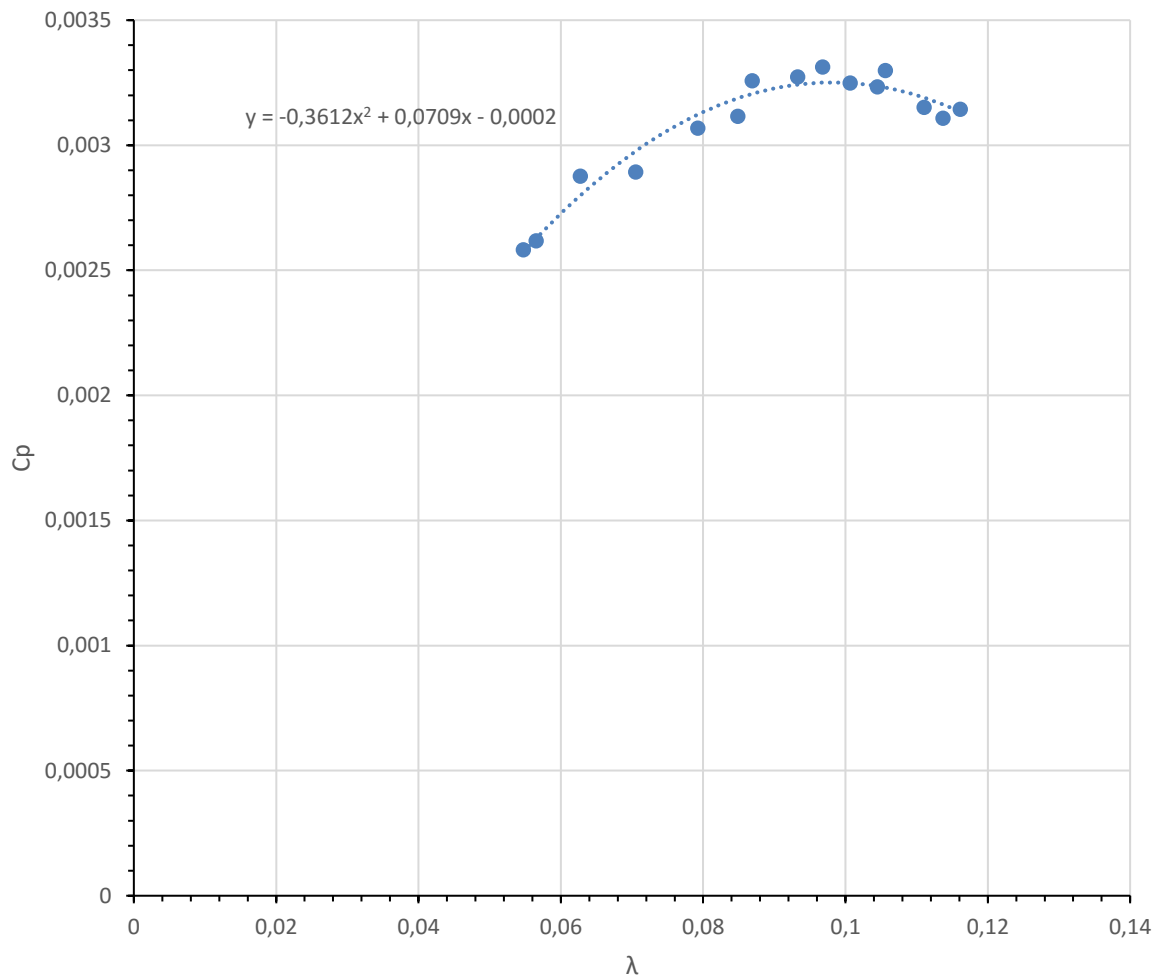


Figura 9.1: Curva de potencia experimental extractor modificado a 9,60 m/s de viento (Túnel 15Hz)

9.2 Curva de potencia a 10,20 m/s (Túnel 16Hz)

Tabla 9.2: Resultados curva de potencia extractor modificado a 10,20 m/s de viento (Túnel 16Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,30276	-0,06415	-0,10912	20,73	10	3,03	28,94	10,15	0,1799	0,0297	0,003423	0,1120
2	0,29965	-0,06401	-0,10984	20,77	10	3,03	28,89	10,09	0,1833	0,0302	0,003545	0,1124
3	0,29915	-0,06355	-0,10888	20,90	10	3,01	28,71	10,08	0,1813	0,0299	0,003493	0,1118
4	0,29990	-0,06309	-0,10824	21,09	10	2,98	28,45	10,10	0,1806	0,0298	0,003434	0,1107
5	0,30046	-0,06305	-0,10777	21,13	10	2,97	28,40	10,11	0,1789	0,0295	0,003385	0,1103
6	0,29971	-0,06264	-0,10854	21,28	10	2,95	28,20	10,09	0,1836	0,0303	0,003463	0,1097
7	0,29975	-0,06361	-0,10923	21,95	10	2,86	27,33	10,09	0,1825	0,0301	0,003336	0,1064
8	0,30137	-0,06711	-0,11801	22,50	10	2,79	26,67	10,12	0,2036	0,0336	0,003598	0,1034
9	0,29900	-0,06833	-0,11971	23,87	10	2,63	25,14	10,08	0,2055	0,0339	0,003471	0,0980
10	0,30247	-0,07172	-0,12697	25,28	10	2,49	23,73	10,15	0,2210	0,0365	0,003455	0,0919
11	0,30168	-0,07541	-0,13180	26,47	10	2,37	22,66	10,13	0,2255	0,0372	0,003382	0,0879
12	0,30210	-0,07707	-0,13409	28,03	10	2,24	21,41	10,14	0,2281	0,0376	0,003223	0,0829
13	0,29993	-0,08569	-0,15011	30,61	10	2,05	19,60	10,10	0,2577	0,0425	0,003374	0,0762
14	0,30123	-0,09113	-0,15929	34,35	10	1,83	17,47	10,12	0,2726	0,0450	0,003159	0,0678
15	0,29867	-0,10579	-0,18325	47,11	10	1,33	12,74	10,07	0,3098	0,0511	0,002655	0,0497

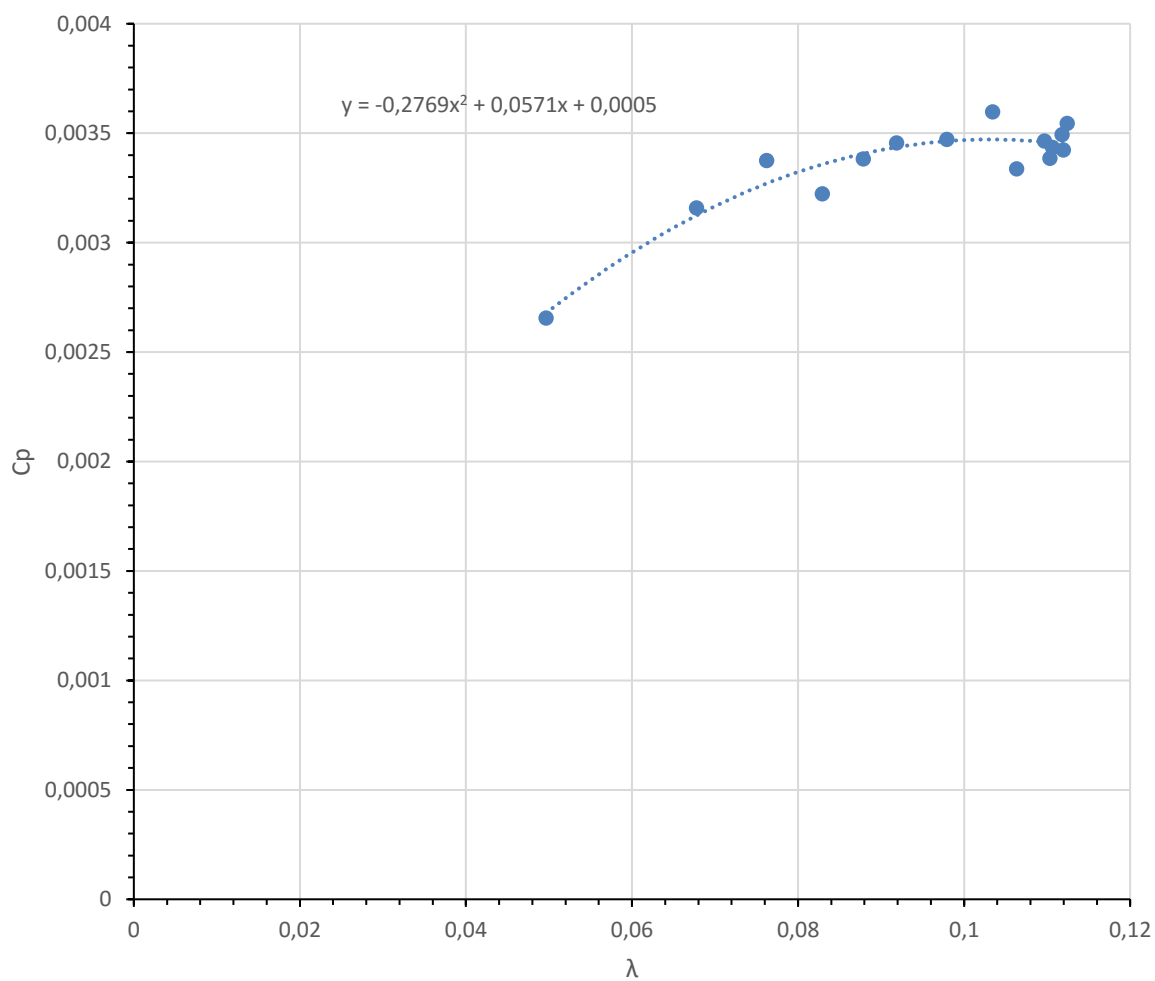


Figura 9.2: Curva de potencia experimental extractor modificado a 10,20 m/s de viento (Túnel 16Hz)

9.3 Curva de potencia a 11 m/s (Túnel 17Hz)

Tabla 9.3: Resultados curva de potencia extractor modificado a 11 m/s de viento (Túnel 17Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,34115	-0,09193	-0,05022	17,72	10	3,54	33,85	10,88	0,1669	0,0275	0,003013	0,1221
2	0,34086	-0,09497	-0,05052	17,78	10	3,53	33,75	10,88	0,1778	0,0293	0,003206	0,1218
3	0,34216	-0,10024	-0,05205	18,19	10	3,45	32,98	10,90	0,1927	0,0318	0,003373	0,1188
4	0,34280	-0,10312	-0,05324	18,87	10	3,33	31,79	10,92	0,1996	0,0329	0,003354	0,1144
5	0,34122	-0,10897	-0,05521	19,47	10	3,23	30,82	10,89	0,2150	0,0355	0,003534	0,1112
6	0,34004	-0,11297	-0,05672	20,39	10	3,08	29,43	10,86	0,2250	0,0371	0,003552	0,1064
7	0,34031	-0,11594	-0,05716	21,30	10	2,95	28,17	10,87	0,2352	0,0388	0,003549	0,1018
8	0,33974	-0,11853	-0,05829	22,51	10	2,79	26,65	10,86	0,2410	0,0398	0,003451	0,0964
9	0,34241	-0,12065	-0,05886	23,81	10	2,64	25,20	10,91	0,2472	0,0408	0,003300	0,0907
10	0,33782	-0,12349	-0,05981	24,35	10	2,58	24,64	10,82	0,2547	0,0420	0,003408	0,0894
11	0,34172	-0,12692	-0,06075	26,04	10	2,41	23,04	10,90	0,2647	0,0437	0,003243	0,0830
12	0,33974	-0,13428	-0,06382	26,47	10	2,37	22,67	10,86	0,2819	0,0465	0,003434	0,0820
13	0,33975	-0,13924	-0,06630	29,63	10	2,12	20,25	10,86	0,2917	0,0481	0,003174	0,0732
14	0,34001	-0,14614	-0,06909	29,64	10	2,12	20,24	10,86	0,3082	0,0509	0,003348	0,0732
15	0,33975	-0,15760	-0,07564	35,79	10	1,76	16,77	10,86	0,3278	0,0541	0,002953	0,0606

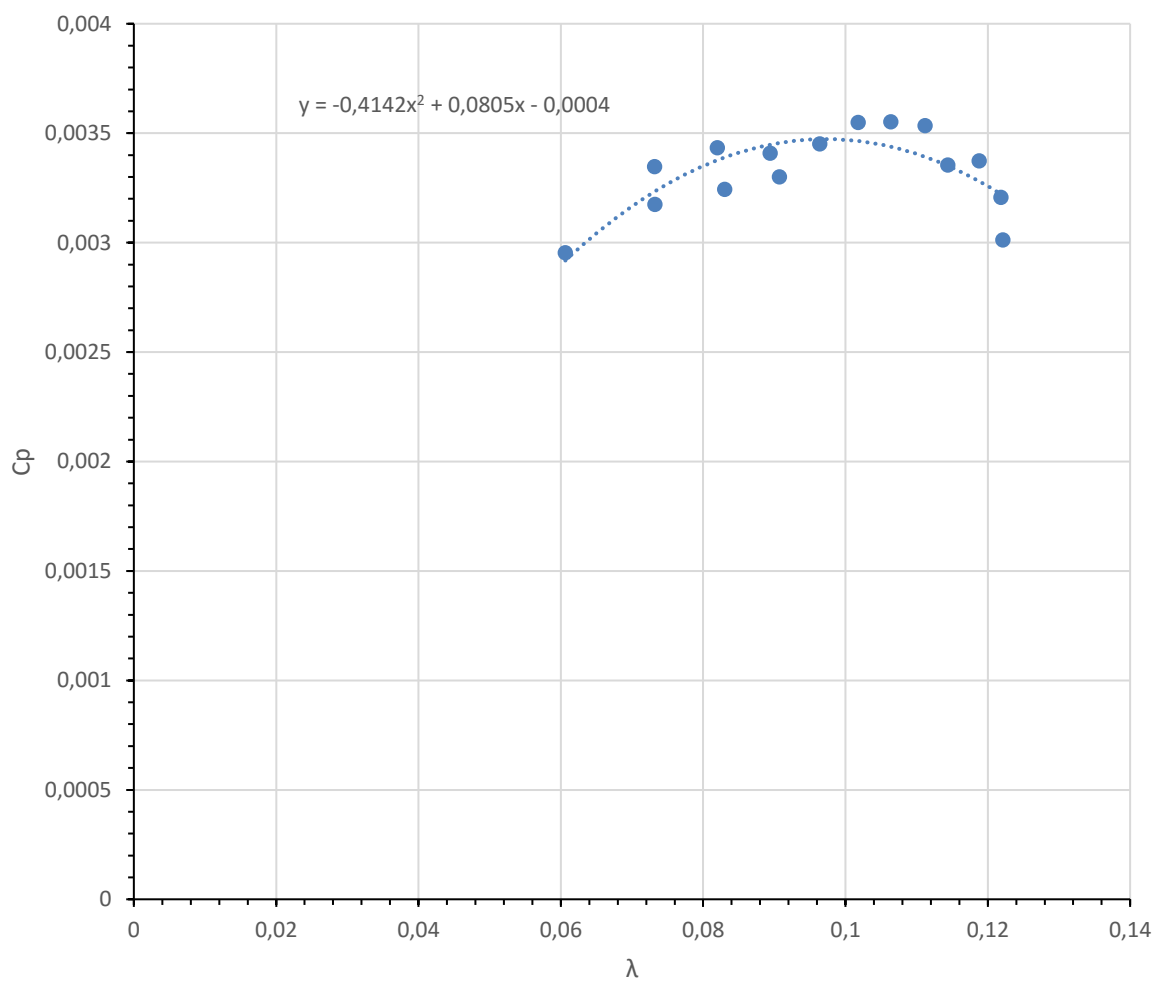


Figura 9.3: Curva de potencia experimental extractor modificado a 11 m/s de viento (Túnel 17Hz)

9.4 Curva de potencia a 11,80 m/s (Túnel 18Hz)

Tabla 9.4: Resultados curva de potencia extractor modificado a 11,80 m/s de viento (Túnel 18Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,37927	-0,05708	-0,09986	13,90	10	4,52	43,16	11,61	0,1711	0,0282	0,003243	0,1459
2	0,37787	-0,05678	-0,10055	13,95	10	4,51	43,02	11,59	0,1751	0,0289	0,003331	0,1458
3	0,37784	-0,05682	-0,10038	14,08	10	4,46	42,61	11,59	0,1743	0,0288	0,003284	0,1444
4	0,37836	-0,05672	-0,10073	14,22	10	4,42	42,20	11,60	0,1760	0,0290	0,003277	0,1429
5	0,38152	-0,05844	-0,10301	14,36	10	4,37	41,77	11,66	0,1783	0,0294	0,003235	0,1407
6	0,38089	-0,06022	-0,10757	14,78	10	4,25	40,60	11,64	0,1894	0,0313	0,003351	0,1369
7	0,38223	-0,06203	-0,11091	15,14	10	4,15	39,64	11,67	0,1955	0,0323	0,003354	0,1334
8	0,38112	-0,06518	-0,11696	15,48	10	4,06	38,75	11,65	0,2071	0,0342	0,003492	0,1306
9	0,38275	-0,06729	-0,12234	16,39	10	3,83	36,61	11,68	0,2202	0,0363	0,003480	0,1231
10	0,38315	-0,07167	-0,12970	16,95	10	3,71	35,41	11,69	0,2321	0,0383	0,003541	0,1190
11	0,38399	-0,07606	-0,13754	18,00	10	3,49	33,33	11,70	0,2459	0,0406	0,003516	0,1118
12	0,38424	-0,08390	-0,15170	19,52	10	3,22	30,73	11,71	0,2712	0,0447	0,003572	0,1031
13	0,38257	-0,10290	-0,18362	24,45	10	2,57	24,54	11,68	0,3229	0,0533	0,003424	0,0825
14	0,38279	-0,13921	-0,24054	37,80	10	1,66	15,87	11,68	0,4053	0,0669	0,002777	0,0534

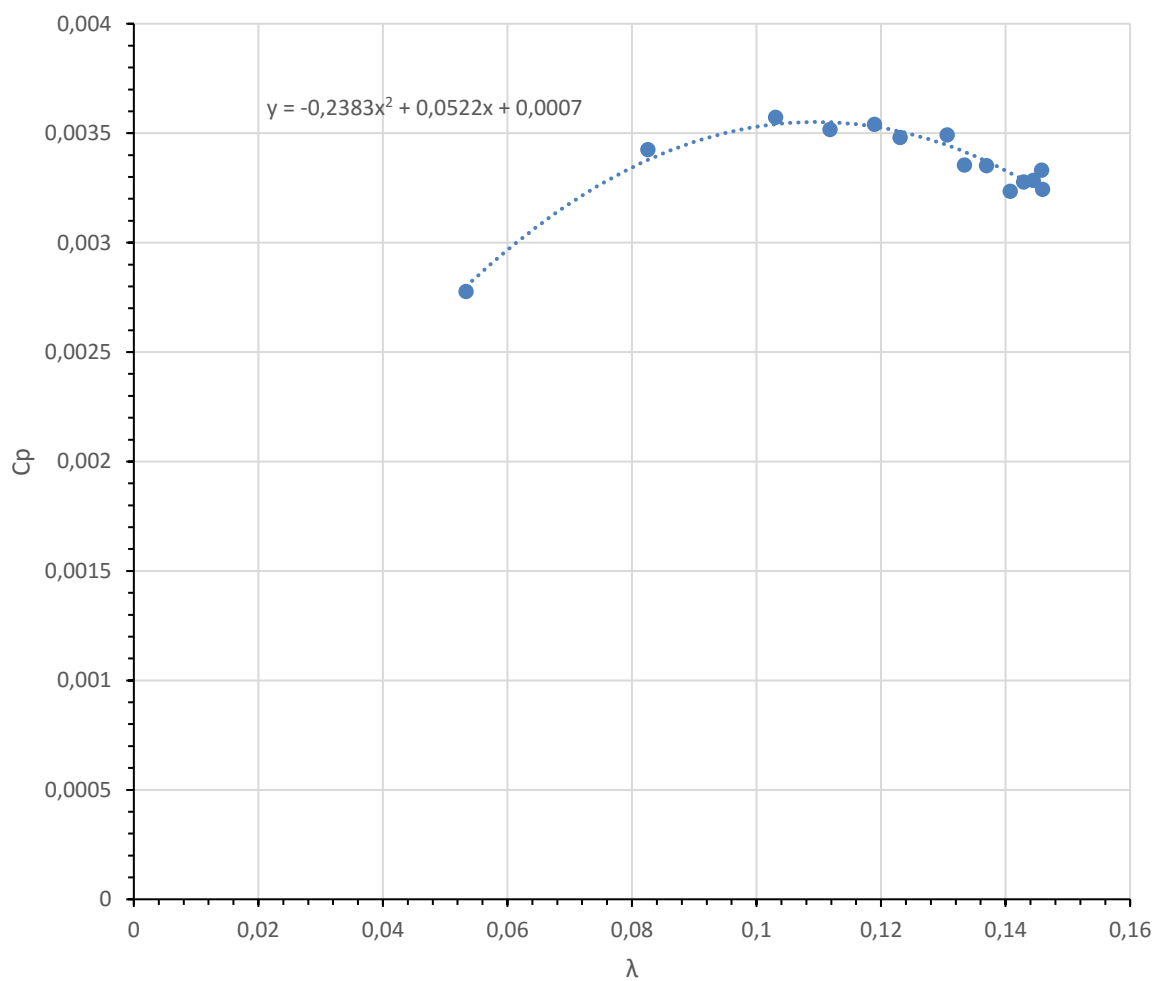


Figura 9.4: Curva de potencia experimental extractor modificado a 11,80 m/s de viento (Túnel 18Hz)

9.5 Curva de potencia a 13 m/s (Túnel 19Hz)

Tabla 9.5: Resultados curva de potencia extractor modificado a 13 m/s de viento (Túnel 19Hz)

n	Pítot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP _A	λ (TSR)
1	0,44862	-0,05551	-0,10324	12,29	10	5,11	48,82	12,94	0,1909	0,0315	0,002959	0,1482
2	0,44858	-0,05613	-0,10297	12,40	10	5,07	48,40	12,94	0,1874	0,0309	0,002880	0,1469
3	0,44901	-0,05667	-0,10307	12,42	10	5,06	48,31	12,95	0,1856	0,0306	0,002842	0,1465
4	0,44811	-0,05626	-0,10436	12,51	10	5,02	47,95	12,93	0,1924	0,0317	0,002936	0,1456
5	0,45046	-0,05806	-0,10636	12,67	10	4,96	47,37	12,97	0,1932	0,0319	0,002882	0,1434
6	0,45189	-0,05908	-0,11025	12,87	10	4,88	46,63	13,00	0,2047	0,0338	0,002987	0,1409
7	0,44862	-0,06046	-0,11280	13,24	10	4,74	45,31	12,94	0,2094	0,0345	0,003012	0,1375
8	0,45189	-0,06348	-0,11826	13,67	10	4,60	43,90	13,00	0,2191	0,0362	0,003011	0,1326
9	0,45046	-0,06594	-0,12270	13,93	10	4,51	43,07	12,97	0,2271	0,0375	0,003080	0,1304
10	0,44955	-0,06977	-0,12983	14,48	10	4,34	41,45	12,96	0,2402	0,0396	0,003149	0,1256
11	0,44901	-0,07348	-0,13735	15,10	10	4,16	39,74	12,95	0,2554	0,0421	0,003218	0,1205
12	0,44977	-0,07752	-0,14361	15,86	10	3,96	37,84	12,96	0,2644	0,0436	0,003160	0,1147
13	0,45189	-0,08451	-0,15676	16,95	10	3,71	35,39	13,00	0,2890	0,0477	0,003201	0,1069
14	0,44950	-0,10007	-0,18393	19,91	10	3,16	30,14	12,96	0,3354	0,0553	0,003198	0,0914
15	0,44862	-0,10876	-0,19876	21,86	10	2,87	31,14	12,94	0,3600	0,0594	0,003138	0,0833
16	0,44901	-0,12003	-0,21036	23,43	10	2,68	32,14	12,95	0,3613	0,0596	0,002933	0,0777
17	0,45046	-0,12371	-0,22249	25,72	10	2,44	23,33	12,97	0,3951	0,0652	0,002903	0,0706

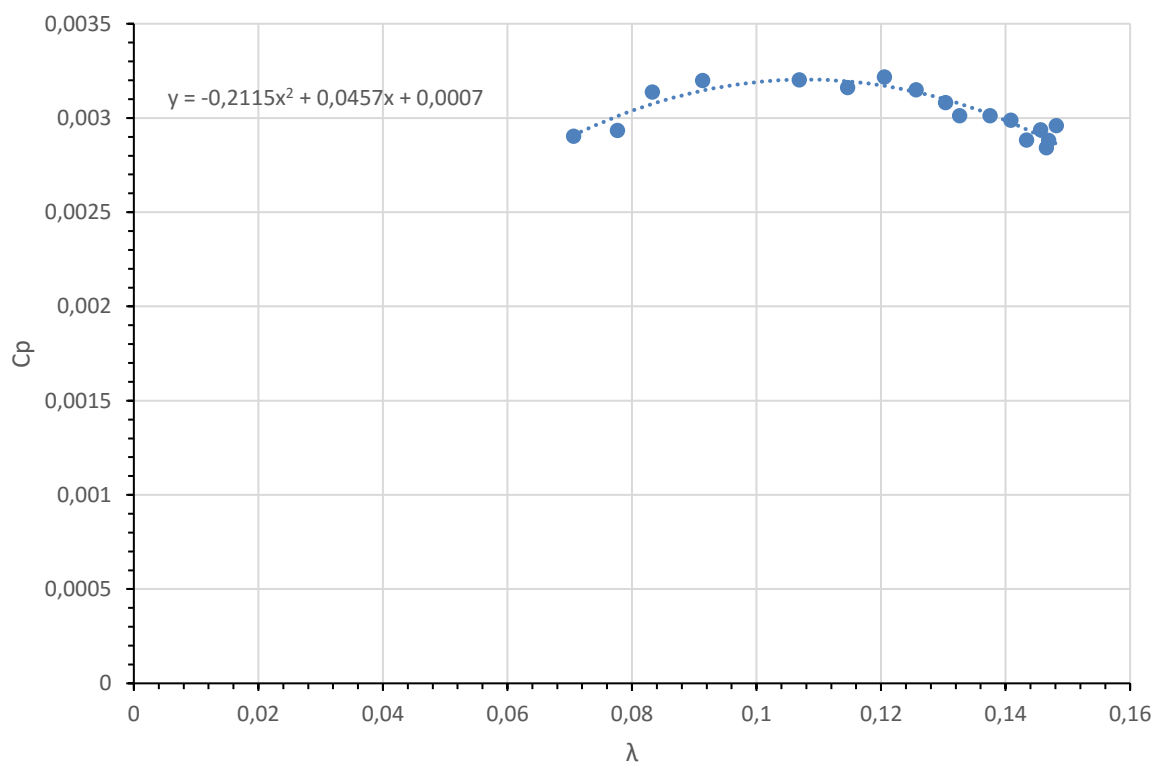


Figura 9.5: Curva de potencia experimental extractor modificado a 13 m/s de viento (Túnel 19Hz)

9.6 Conjunto curvas de potencia experimentales extractor modificado

En el presente punto se representan las anteriores curvas de potencia obtenidas en el ensayo del *extractor modificado* en un mismo gráfico de dispersión. Este conjunto de curvas se representa en la Figura 9.6.

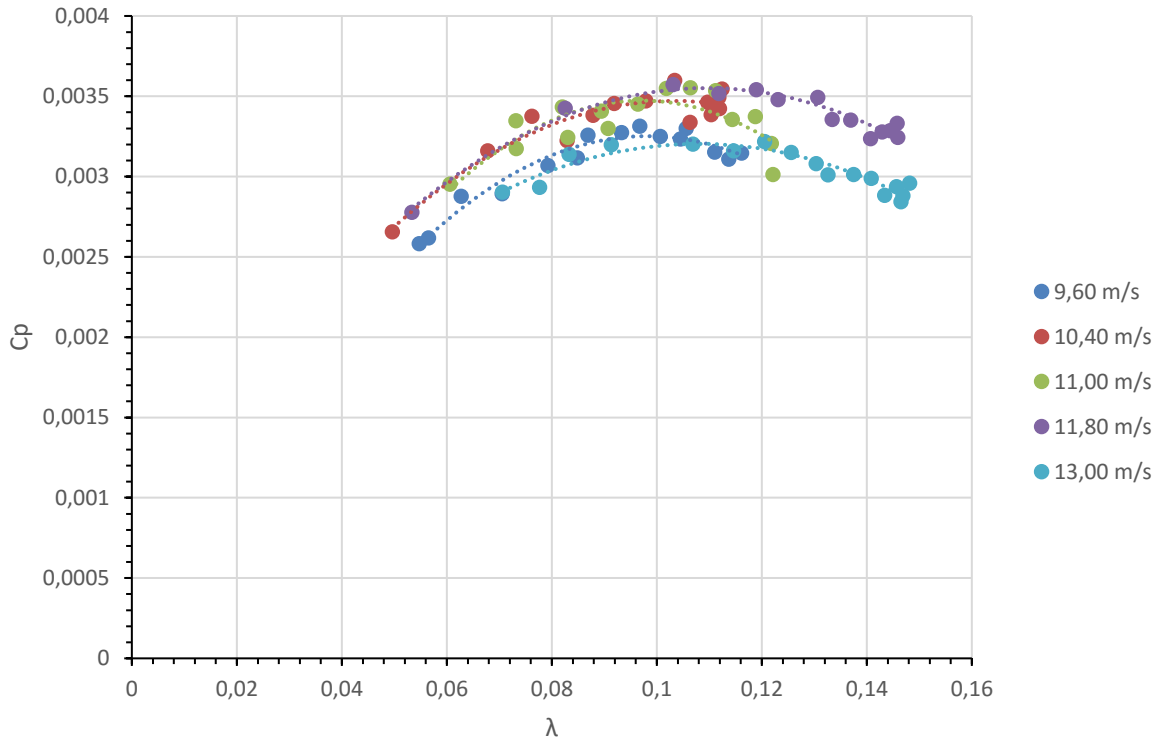


Figura 9.6: Conjunto de curvas de potencia del extractor modificado a diferentes velocidades de viento

9.7 Comparativa entre extractor comercial y modificado

Si se comparan los resultados obtenidos en los ensayos del extractor comercial y el modificado, concretamente las figuras 7.6 y 9.6 respectivamente, obtenemos la Figura 9.7 siguiente.

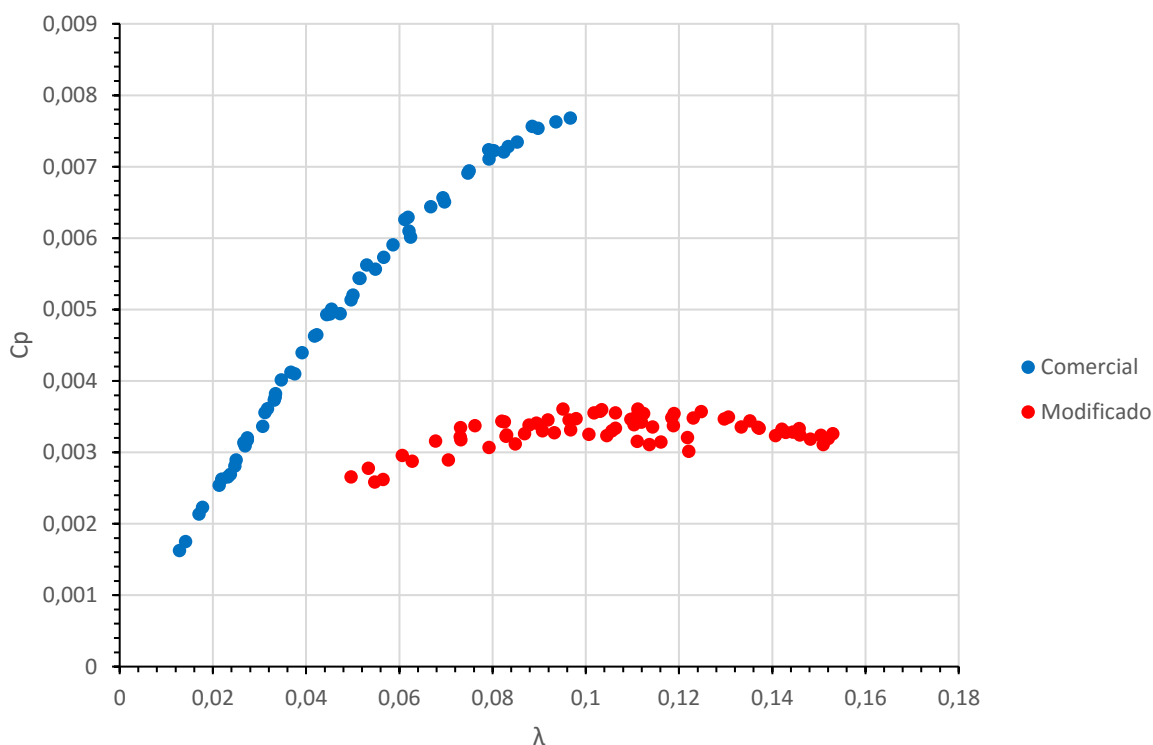


Figura 9.7: Comparativa de curvas de potencia experimentales entre extractor comercial y modificado

Primeramente, es destacable la mayor dispersión que existe entre las diferentes curvas de potencia obtenidas en el extractor modificado. A pesar de que gráficamente los valores parecen distantes entre sí, trataremos esta comparación aproximando los valores del extractor comercial y modificado como si únicamente existieran dos curvas de potencia distintas.

En siguiente lugar, y contrariamente a lo que marca la teoría, en el extractor modificado se ha reducido considerablemente su eficiencia energética por lo que ya, solo con estos resultados, quedaría descartada la viabilidad de esta modificación puesto que su principal objetivo era la de mejorar dicha eficiencia respecto el extractor comercial. Por otro lado, se intuye, puesto que se desconoce el tramo de bajada del extractor comercial, que con la instalación de los perfiles de ala permiten llegar a TSR superiores debido al incremento de longitud desde el centro del rotor hasta el extremo del ala.

Debido a estos resultados inesperados, y debido a la curiosidad que despiertan, se procederá a un análisis para determinar por qué es causada esta bajada de potencia respecto al extractor comercial.

Se plantean dos posibles hipótesis sobre las influencias que pueden existir en estos resultados:

- 1) La estela del flujo generada por el extractor interfiere de forma desfavorable al funcionamiento de los perfiles de ala, generando diferenciales de presión irregulares (debido al flujo turbulento) y por lo tanto las fuerzas de sustentación generadas no favorecen a un aumento del par en el sentido de giro de trabajo en el eje del extractor.
- 2) En segundo lugar, y aunque se podría englobar dentro del primer caso, el fenómeno de extracción que genera el extractor y debido a la succión que genera en el interior de los álabes genere esfuerzos contrarios a los generados por los perfiles de ala y que por lo tanto, el par generado en el eje se vea mermado. Se comenta que este punto se podría englobar en el primero, puesto que el caudal de extracción también afectaría a la estela de flujo que deja atrás el extractor.

Debido a lo expuesto, en el siguiente punto se tratará el análisis de la estela del flujo que deja el extractor detrás de sí empleando la metodología de "*Tuft-Grid*".

10 Análisis de la estela del flujo del extractor modificado

10.1 Análisis de la estela del flujo de aire

En este punto se describirá las influencias que puede generar el efecto de la estela que deja atrás el extractor respecto al movimiento de los perfiles de ala instalados.

Tal y como se planteó en la hipótesis uno del punto anterior, es probable que esta pérdida de potencia del extractor modificado respecto al comercial pueda ser debido a los efectos que genera la estela respecto a las alas. Para ello, primero es necesario comprender los fenómenos físicos que se generan y el nuevo concepto de "arrastre por presión".

Cuando una corriente de fluido se mueve alrededor de un cuerpo, tiende a adherirse a la superficie en porción de la longitud del cuerpo. Después de cierto punto, la capa límite delgada se separa de la superficie, lo que hace que se genere una estela turbulenta. Este fenómeno se representa en la Figura 10.1.

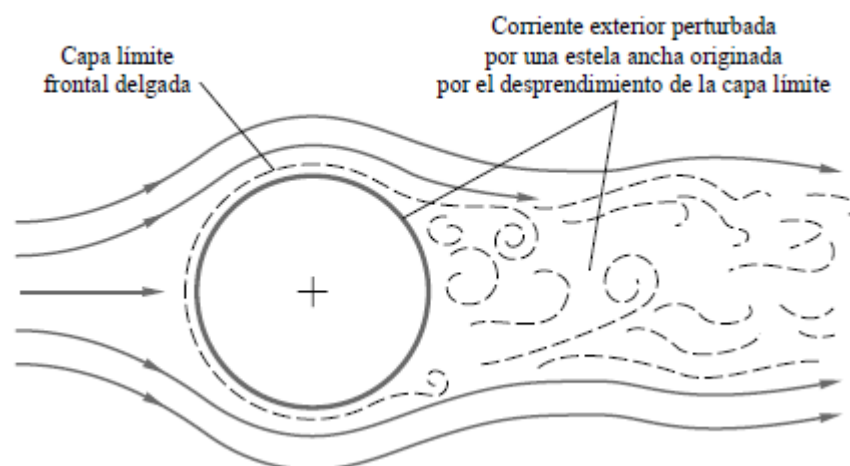


Figura 10.1: Generación de la estela turbulenta debido al desprendimiento de la capa límite [11]

La presión en la estela es mucho más baja que la presión en el punto de estancamiento en el frente del cuerpo. Así se crea una fuerza neta que actúa en dirección opuesta a la del movimiento del aire. Esta fuerza es el arrastre por presión.

Si puede hacerse que el punto de separación ocurra en un sitio lejano de la parte posterior del cuerpo, el tamaño de la estela disminuye y por consiguiente aumenta la presión en ella, donde finalmente la fuerza neta de arrastre por presión se ve reducida. Este es el razonamiento que se sigue para dar formas aerodinámicas y como ejemplo de este tipo de situación, y que hemos podido ver estos días en los JJ.OO, son los hoyuelos en las pelotas de

golf. Estos hoyuelos permiten un desprendimiento de la capa límite más alejada y en consecuencia una estela más estrecha, aportando finalmente una reducción de la resistencia de la pelota a desplazarse en el aire permitiendo lanzamientos mayores.

En el caso que nos ocupa, no podemos modificar el tipo de estela que se genera en el extractor, pero si podemos analizar el tipo de estela que deja detrás de sí para tratar de intuir si realmente los puntos de presión baja en la estela pueden afectar negativamente al funcionamiento de las alas. Para ello, se emplea la metodología de Tuft-Grid que se describe en el siguiente punto.

10.2 Metodología del ensayo mediante Tuft Grid

10.2.1 Descripción técnica del Tuft Grid

El Tuft-Grid es una técnica de visualización de flujos en superficies mediante el uso de tiras o mechones. En el ensayo en el túnel de viento, se ha elaborado un panel donde se han instalado estos mechones de forma uniforme.

La finalidad de esta técnica es poder hacer visible las corrientes de flujo invisibles al ojo humano y aunque no nos proporciona unos resultados cuantitativos, si permite conocer cualitativamente la dirección y fuerza del viento, variabilidades respecto al tiempo o incluso poder determinar posibles secuencias de eventos que se producen durante un periodo. Este efecto es similar al que se produce en los software de simulación CFD de fluidos mediante los vectores de flujo, aunque en nuestro caso no se trata de una simulación sino de un flujo real.

Esta técnica que a priori parece rudimentaria, es empleada en sectores de vanguardia tecnológica como son la aeronáutica o automovilismo tal y como puede observarse en la Figura 10.2:



Figura 10.2: Empleo de técnicas con "Tuft" en aeronáutica (Fuente: www.grc.nasa.gov)

Por otro lado, otra técnica que permite, posiblemente, una mejor visualización del flujo es mediante máquinas de humo y haz laser sincronizado en el trigger de la cámara de alta velocidad. No obstante, no pudimos realizar este tipo de ensayo debido a los sistemas de alarma contra incendios del laboratorio.

10.2.2 Adquisición de imágenes

Puesto que no es posible analizar las corrientes de aire a ojo desnudo en el Tuft-Grid, ha sido necesario la instalación de una cámara de alta velocidad donde se tomaron a una velocidad de 300 fps (frame per second) durante 10 segundos, obteniendo un total de 3000 fotografías.

Con la finalidad de poder establecer referencias y puntos de comparación, este análisis se estudió en las velocidades de viento de 10,20 m/s y 11 m/s correspondientes a una frecuencia de giro de los motores del túnel de 16 y 17 Hz respectivamente; y las imágenes correspondientes para posiciones de las alas respecto el extractor concretas, siendo estas las siguientes:

- 0°: posición de las alas paralelas a la boca de salida del túnel de viento
- 60°: posición correspondiente a un desplazamiento angular de 60° respecto la posición de 0°
- 90°: posición de las alas perpendicular a la boca de salida del túnel de viento.

En la Figura 10.3 y 10.4 se puede observar la instalación del Tuft Grid, cámara y el extractor modificado el laboratorio:



Figura 10.3: Instalación del ensayo frontal metodología Tuft-Grid



Figura 10.4: Instalación del ensayo posterior metodología Tuft-Grid

En estas figuras se observa que se han incorporado dos focos de iluminación, estos focos han sido requeridos debido que la captura de imágenes se ha realizado a alta velocidad, en algunas muestras se necesitaba un mayor aporte lumínico ya que estas salían oscuras.

Por otro lado, en la Figura 10.5 se muestra el momento de captura de imágenes una vez el sistema está en funcionamiento y el extractor funcionando a un régimen estable. Es necesario añadir que estas muestras se han realizado con la mínima fuerza de frenado posible, únicamente colocando la cuerda que ejerce de freno.

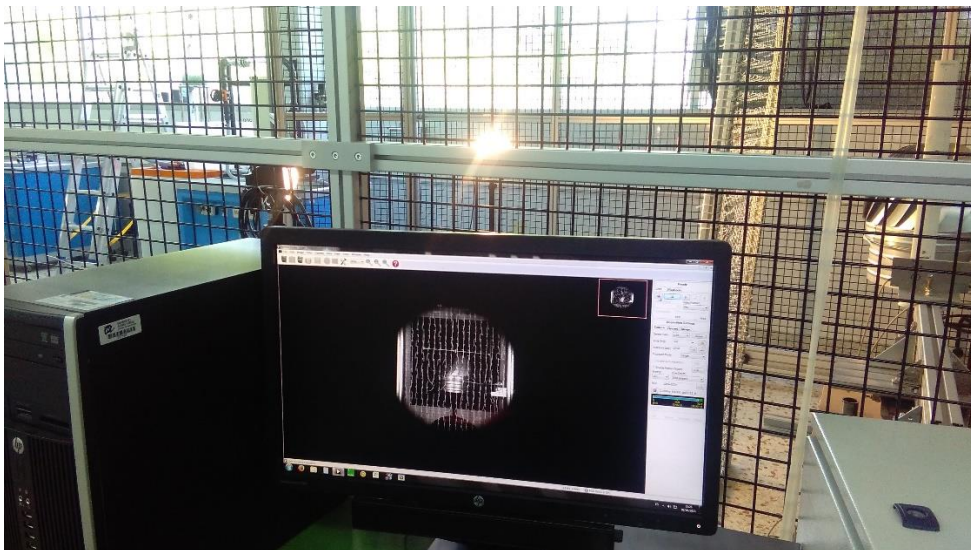


Figura 10.5: Captura de imágenes en Tuft-Grid

10.2.3 Procesado de imágenes mediante MatLAB

Para el procesado de las imágenes se ha realizado mediante el Software MatLAB, donde ha sido necesario elaborar un script donde haga el promedio del conjunto de las imágenes a analizar, posteriormente elimine este promedio de cada fotografía con la finalidad de que solo queden los elementos diferentes de cada imagen y finalmente, guarde la imagen.

Puesto que en primera instancia parece un poco extraño hablar de “un promedio de un conjunto de fotos” para quien no está habituado al tratamiento de imágenes; lo que hace el script es primeramente pasar la imagen a formato de “Blanco y Negro” y donde posteriormente esta imagen es interpretada como una matriz de 1024x1280 (resolución de la imagen) donde cada pixel tiene un valor dentro de la escala de grises (de 0 a 255). Por lo tanto, teniendo una matriz, que hace referencia a una imagen, con valores enteros positivos podemos operar estas matrices para poder obtener finalmente una imagen para cada posición donde se ha eliminado el promedio del conjunto. En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de lo descrito.

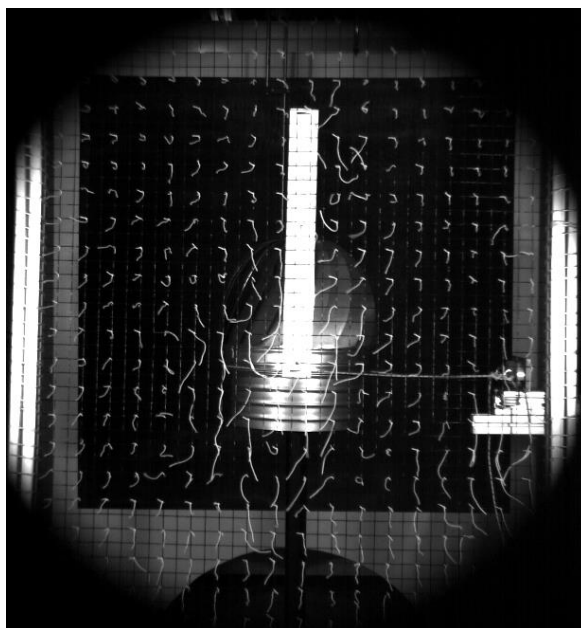


Figura 10.6: Imagen original captada en posición de 90° de las alas respecto del túnel de viento

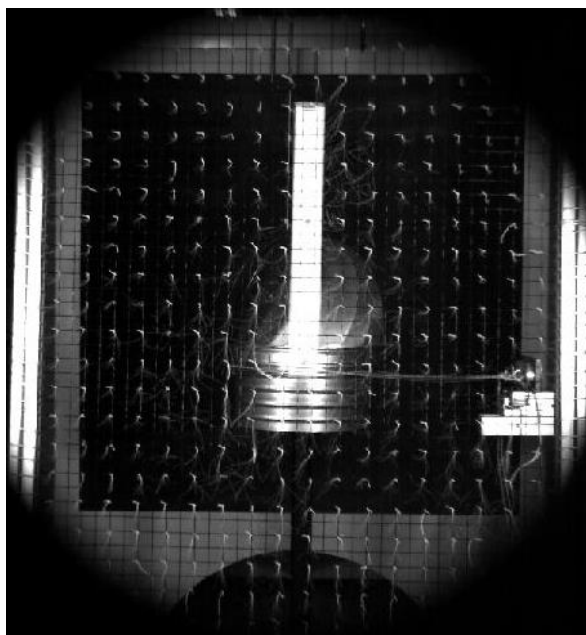


Figura 10.7: Imagen promedio en posición de 90° de las alas respecto del túnel de viento. Nótese que aquí los mechones quedan difuminados al tratarse del promedio con el resto de imágenes

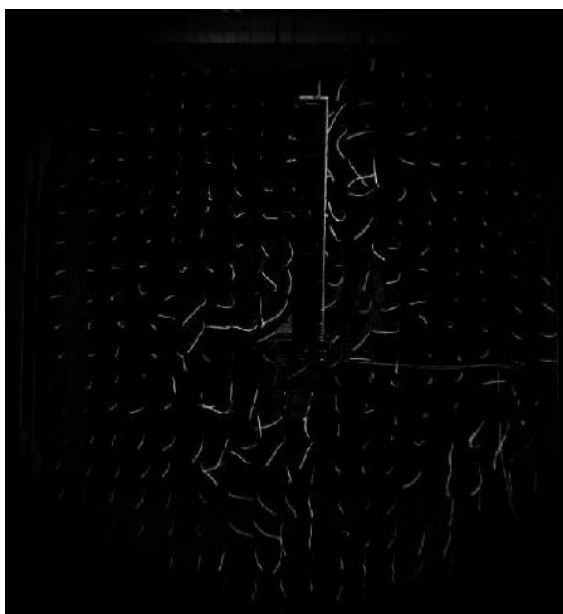


Figura 10.8: Imagen original donde se ha eliminado el valor promedio del resto de imágenes en posición de 90° de las alas respecto del túnel de viento.

Como se puede observar en la Figura 10.7, obtenemos una imagen donde se ha eliminado el promedio del resto de imágenes y solo permanecen los elementos diferentes. Con esta técnica permite una mayor facilidad de comparación entre las diferentes posiciones y a diferentes velocidades para evaluar si hay algún evento repetitivo que pueda alterar el funcionamiento de los perfiles de ala.

10.3 Script elaborado

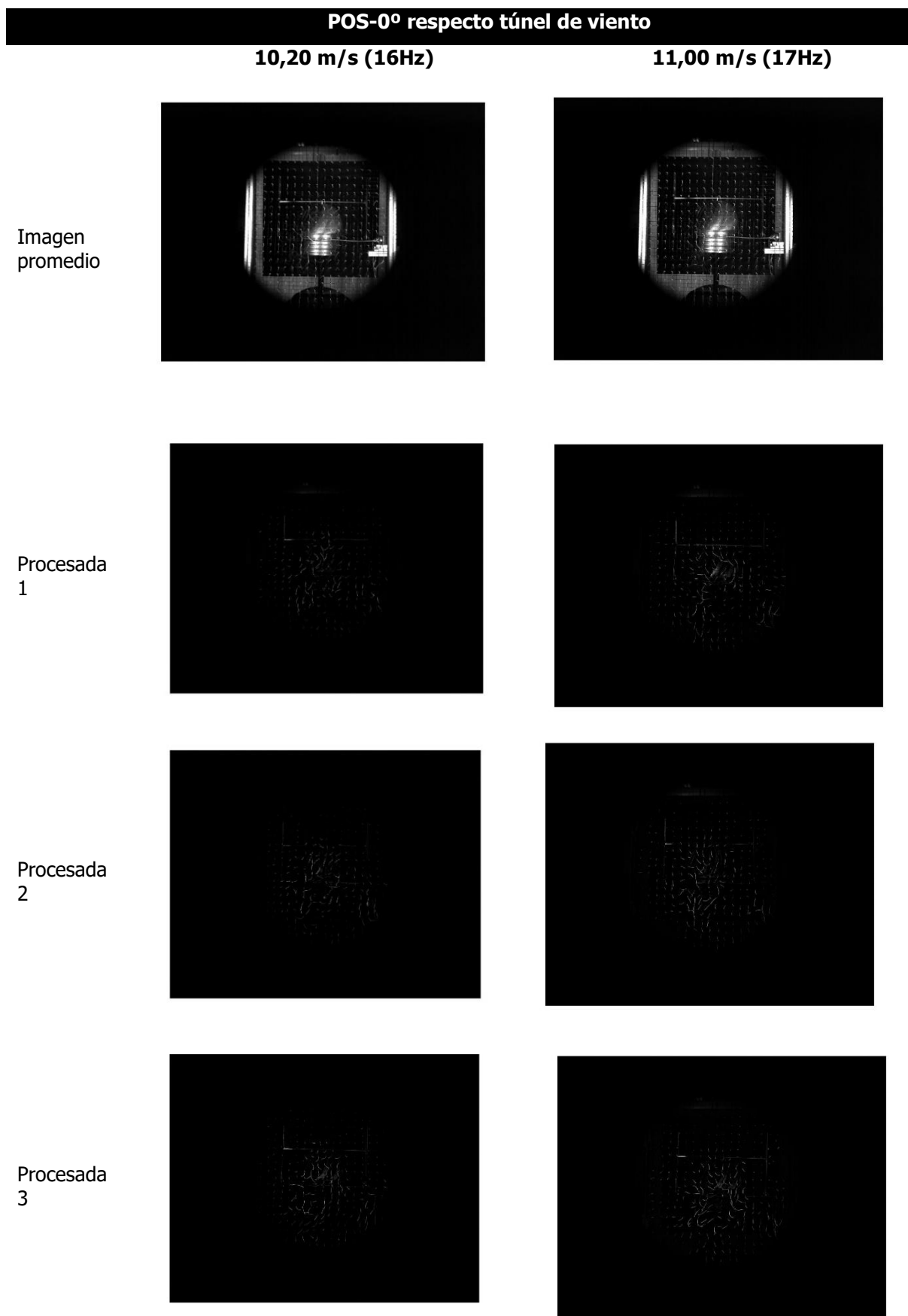
```

clear
clc
%Número de fotos (valor a introducir manual)
%
n=9
%
%
%Inicializar la primera foto:
I0 = imread('ImgA1.jpg')
sumImage = double(I0);
%
%Leer las imagenes restantes:
%
for i=2:n %Empezar a partir de la foto siguiente a la abierta
    Images = imread(['ImgA',num2str(i),'.jpg']);
    sumImage = sumImage + double(Images);
end;
%
%Promedio de las fotos:
%
meanImage = sumImage / n;
meanImage=uint8(meanImage);
figure('Name','Imagen Promedio','NumberTitle','off')
imshow(meanImage)
filename=sprintf('Imagen Promedio.jpg');
saveas(gcf,filename,'jpg');
MaxMeanImage=max(max(meanImage))
%
%
%Obtener cada imagen ya procesada:
%
I00=I0;
%Modificar el valor de la "i" del siguiente bucle para continuar de una
%imagen en concreto.
for i=1:n
    Images2 = imread(['ImgA',num2str(i),'.jpg']);
    Images2=double(Images2);
    I1=Images2-double(meanImage);
    I1=uint8(I1);
    figure(i);
    imshow(I1);
    maxProcesadas=max(max(I1))
    filename=sprintf('Procesada_%d.jpg',i); %Cambiar el titulo ProcesadaX
    cada vez que se continua con una serie de imágenes.
    saveas(gcf,filename,'jpg');
end
close all
display('Finalizado')

```

Observación: Todas los archivos de las imágenes deben empezar con el nombre "ImgA", nombre procedente de la cámara, y a continuación con una secuencia de números correlativos para cada imagen diferente.

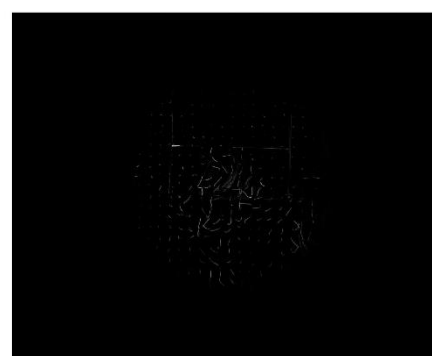
10.4 Resultados del ensayo Tuft Grid y procesado imágenes



Procesada
4



Procesada
5

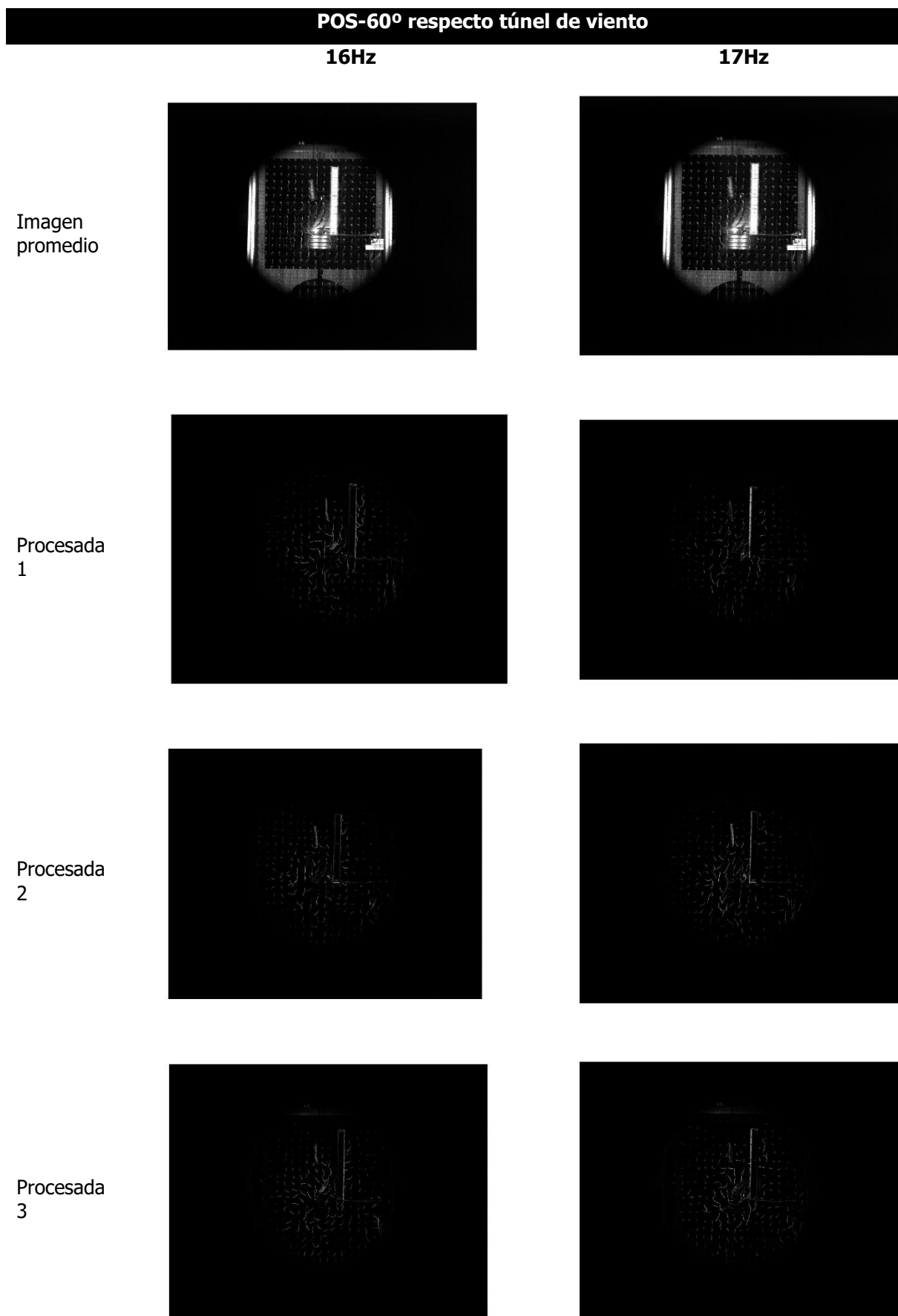


Procesada
6

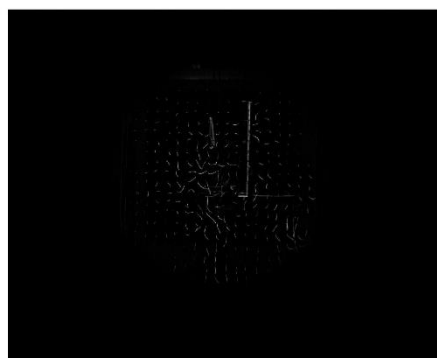
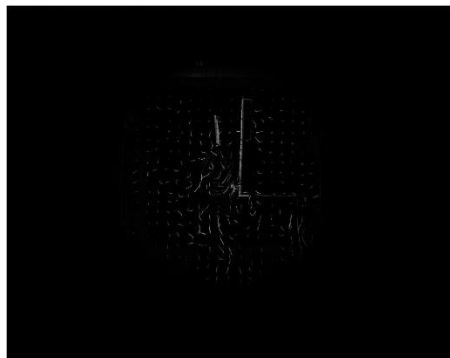


Procesada
7

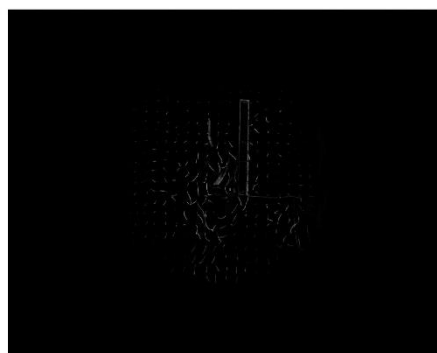
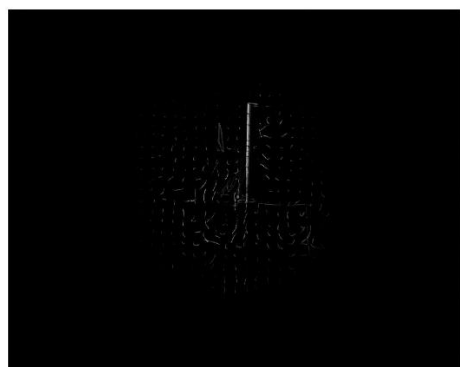




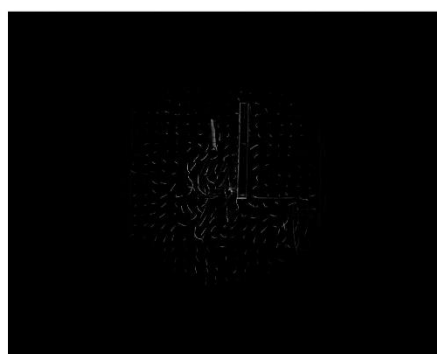
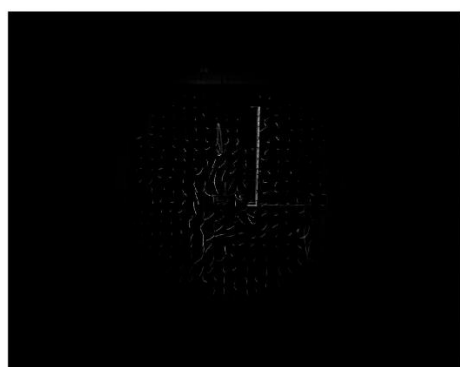
Procesada
4



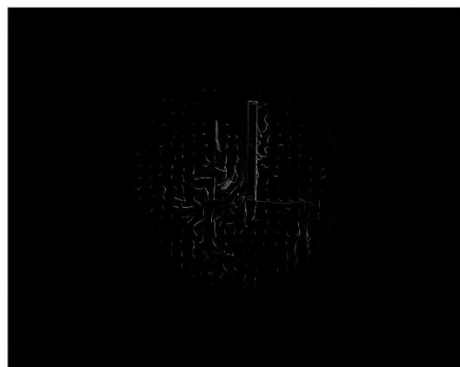
Procesada
5

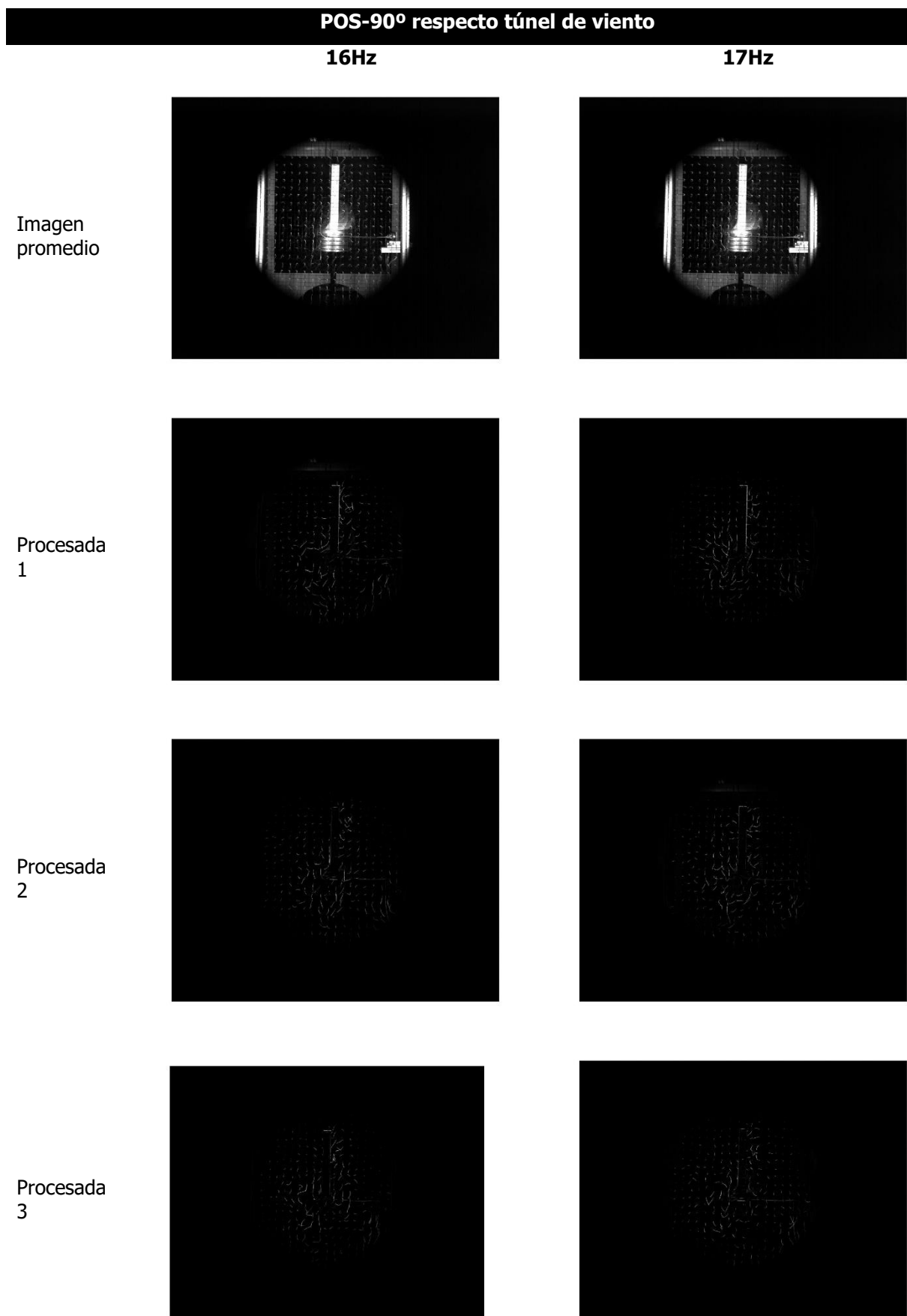


Procesada
6

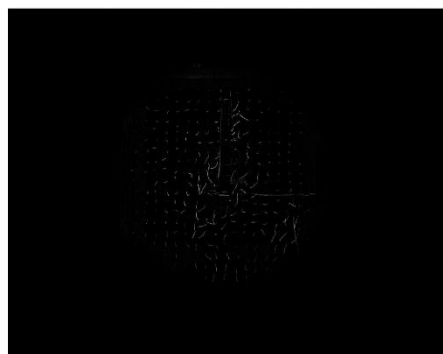


Procesada
7





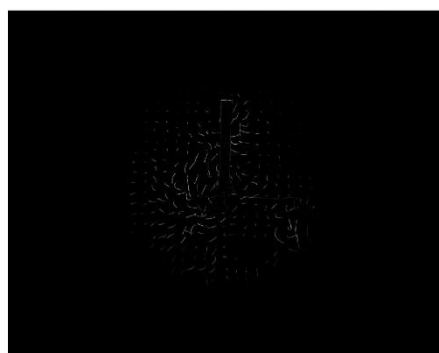
Procesada
4



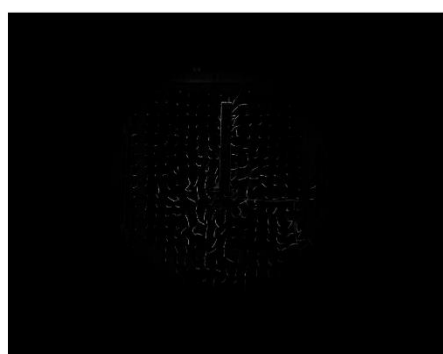
Procesada
5



Procesada
6



Procesada
7



10.5 Conclusiones análisis estela del flujo

Después del análisis de la estela del flujo mediante el Tuft-Grid, a diferentes velocidades y en diferentes puntos concretos a lo largo del movimiento de los perfiles de ala alrededor del extractor, no permite establecer unas conclusiones definidas puesto que los sucesos generados en la estela son completamente aleatorios y eventuales entre sí, incluso si lo comparamos con las mismas posiciones y a una misma velocidad en una vuelta diferente del extractor. Debido a esto, no permite establecer una referencia donde comparar una velocidad con otra, puesto que la estela ya es diferente en una misma velocidad y en cada giro del extractor tal y como puede verse en el punto anterior de resultados.

No obstante, se intuye que pueden existir puntos donde se superpongan la baja presión de la estela con la baja presión del perfil de ala, suponiendo un incremento de la fuerza neta del arrastre por presión y en consecuencia mayor dificultad en el desplazamiento de las alas. Este fenómeno podría reducirse con una mayor longitud entre alas donde los efectos de la estela puedan verse reducidos, aunque en el caso del ensayo esta longitud está limitada a las dimensiones de la boca de salida del túnel. Por el contrario, esta es una hipótesis que no ha podido contrastarse con los resultados obtenidos con el estudio de la estela.

A causa de estos resultados, se ha decidido ensayar de nuevo el extractor eliminando los perfiles de ala y eliminando la capacidad de extracción, tapando directamente la boca de succión con la finalidad de evaluar la hipótesis 2 establecida en el punto 9.7. Con este ensayo, se tratará de obtener las curvas de potencia del *generador comercial* y analizar si se produce algún cambio a lo que refiere a las curvas de potencia sin extracción. Este ensayo se detalla en el punto siguiente.

11 Análisis del efecto extractor

Puesto que en el análisis de la estela del flujo que deja el extractor detrás de sí no se han podido extraer conclusiones relevantes respecto al fenómeno de la bajada de potencia del extractor modificado respecto el extractor comercial, se decide ensayar de nuevo el extractor comercial desinstalando los perfiles de ala incorporados en la modificación pero eliminando la capacidad de extracción del propio extractor. Este proceso es contraproducente, ya que con el eliminamos la principal función del equipo la cual es la mejora de la renovación del aire del interior del edificio. Sin embargo, nos debería permitir conocer si realmente los efectos producidos por la extracción son significativos a lo que refiere a la eficiencia energética del extractor. En la Figura 11.1 puede verse de nuevo el extractor sin los perfiles de ala pero con la boca de succión obstruida.



Figura 11.1: Extractor comercial con boca de succión obstruida

En los siguientes puntos se detallarán los resultados obtenidos en el ensayo del extractor con la configuración actual y empleando la misma metodología que en los casos anteriores, indicada en el punto 6.4. La densidad del aire empleada en los siguientes cálculos es de $1,175 \text{ kg/m}^3$ correspondiente a una presión atmosférica y temperatura de 1009 hPa y 26°C respectivamente.

11.1 Curva de potencia a 9,60 m/s (Túnel 15Hz)

Tabla 11.1: Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 9,60 m/s de viento (Túnel a 15Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,26767	-0,17484	0,03336	10,98	10	5,72	54,66	9,48	0,8328	0,1374	0,0367	0,0996
2	0,26781	-0,17579	0,03218	11,13	10	5,65	53,91	9,48	0,8319	0,1373	0,0362	0,0982
3	0,26869	-0,17672	0,03173	11,37	10	5,52	52,75	9,50	0,8338	0,1376	0,0353	0,0960
4	0,26806	-0,17884	0,03068	11,75	10	5,35	51,08	9,49	0,8381	0,1383	0,0345	0,0930
5	0,26805	-0,18115	0,02908	12,18	10	5,16	49,27	9,49	0,8409	0,1388	0,0334	0,0897
6	0,26824	-0,18507	0,02706	12,47	10	5,04	48,10	9,49	0,8485	0,1400	0,0328	0,0876
7	0,26782	-0,18611	0,02625	13,06	10	4,81	45,93	9,48	0,8494	0,1402	0,0315	0,0837
8	0,26753	-0,18929	0,02278	13,54	10	4,64	44,31	9,48	0,8483	0,1400	0,0304	0,0808
9	0,26768	-0,19296	0,02200	14,10	10	4,46	42,54	9,48	0,8598	0,1419	0,0295	0,0775
10	0,26605	-0,19489	0,01921	14,70	10	4,27	40,82	9,45	0,8564	0,1413	0,0285	0,0746
11	0,26690	-0,19399	0,02288	15,69	10	4,01	38,25	9,47	0,8675	0,1431	0,0269	0,0698
12	0,26807	-0,20400	0,01404	16,60	10	3,79	36,15	9,49	0,8722	0,1439	0,0254	0,0658
13	0,26751	-0,20866	0,00982	17,70	10	3,55	33,90	9,48	0,8739	0,1442	0,0239	0,0618
14	0,26950	-0,21131	0,00729	19,38	10	3,24	30,96	9,52	0,8744	0,1443	0,0216	0,0562
15	0,26713	-0,21499	0,00436	21,91	10	2,87	27,38	9,47	0,8774	0,1448	0,0195	0,0500
16	0,26693	-0,22387	-0,00204	24,95	10	2,52	24,05	9,47	0,8873	0,1464	0,0173	0,0439
17	0,26864	-0,23238	-0,00804	31,34	10	2,00	19,14	9,50	0,8974	0,1481	0,0138	0,0348

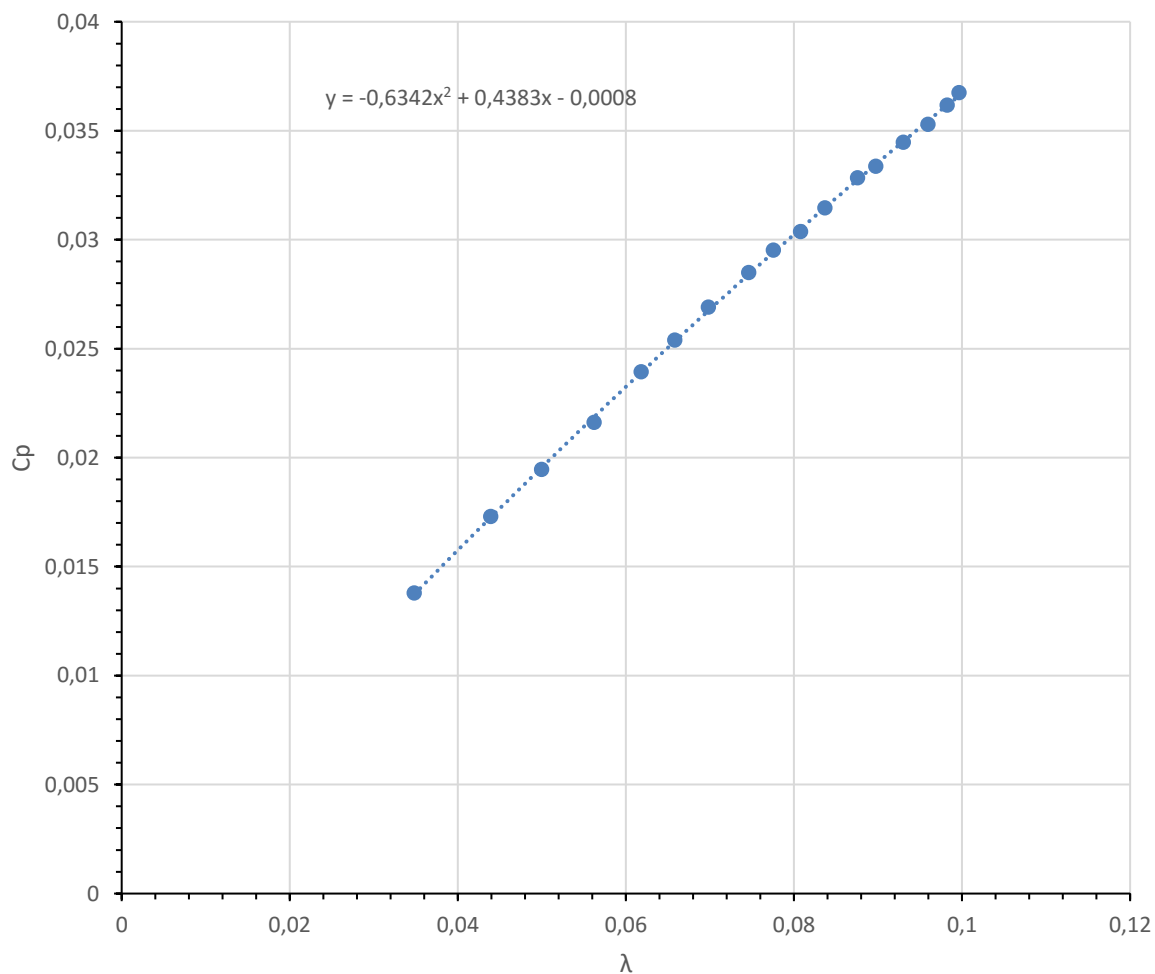


Figura 11.2: Curva de potencia extractor comercial sin succión a 9,60 m/s de viento (Túnel a 15Hz)

11.2 Curva de potencia a 10,40 m/s (Túnel 16Hz)

Tabla 11.2: Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 10,40 m/s de viento (Túnel a 16Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,30528	-0,18350	0,02998	9,84	10	6,38	60,95	10,20	0,8539	0,1409	0,0337	0,1033
2	0,30628	-0,18593	0,02934	10,13	10	6,20	59,25	10,22	0,8611	0,1421	0,0329	0,1002
3	0,30673	-0,18775	0,02716	10,22	10	6,15	58,69	10,23	0,8596	0,1418	0,0324	0,0992
4	0,30407	-0,19020	0,02599	10,53	10	5,97	56,98	10,18	0,8648	0,1427	0,0322	0,0968
5	0,30610	-0,19181	0,02538	10,55	10	5,96	56,89	10,21	0,8687	0,1433	0,0319	0,0962
6	0,30376	-0,19424	0,02346	10,96	10	5,73	54,76	10,17	0,8708	0,1437	0,0312	0,0930
7	0,30548	-0,19835	0,02080	11,35	10	5,54	52,86	10,20	0,8766	0,1446	0,0300	0,0895
8	0,30667	-0,20250	0,01807	11,97	10	5,25	50,11	10,23	0,8823	0,1456	0,0284	0,0847
9	0,30653	-0,20567	0,01569	12,43	10	5,06	48,28	10,22	0,8855	0,1461	0,0275	0,0816
10	0,30510	-0,20900	0,01323	13,33	10	4,71	45,01	10,20	0,8889	0,1467	0,0260	0,0763
11	0,30359	-0,21572	0,00918	14,19	10	4,43	42,27	10,17	0,8996	0,1484	0,0249	0,0718
12	0,30452	-0,22174	0,00455	15,60	10	4,03	38,45	10,18	0,9052	0,1494	0,0227	0,0652
13	0,30415	-0,22558	0,00127	16,60	10	3,79	36,15	10,18	0,9074	0,1497	0,0214	0,0614
14	0,30436	-0,23469	-0,00499	18,79	10	3,34	31,93	10,18	0,9188	0,1516	0,0191	0,0542
15	0,30410	-0,23883	-0,00940	22,76	10	2,76	26,36	10,18	0,9177	0,1514	0,0158	0,0448
16	0,30610	-0,25798	-0,02243	28,82	10	2,18	20,82	10,21	0,9422	0,1555	0,0127	0,0352
17	0,30195	-0,26525	-0,02949	43,27	10	1,45	13,87	10,14	0,9430	0,1556	0,0086	0,0236

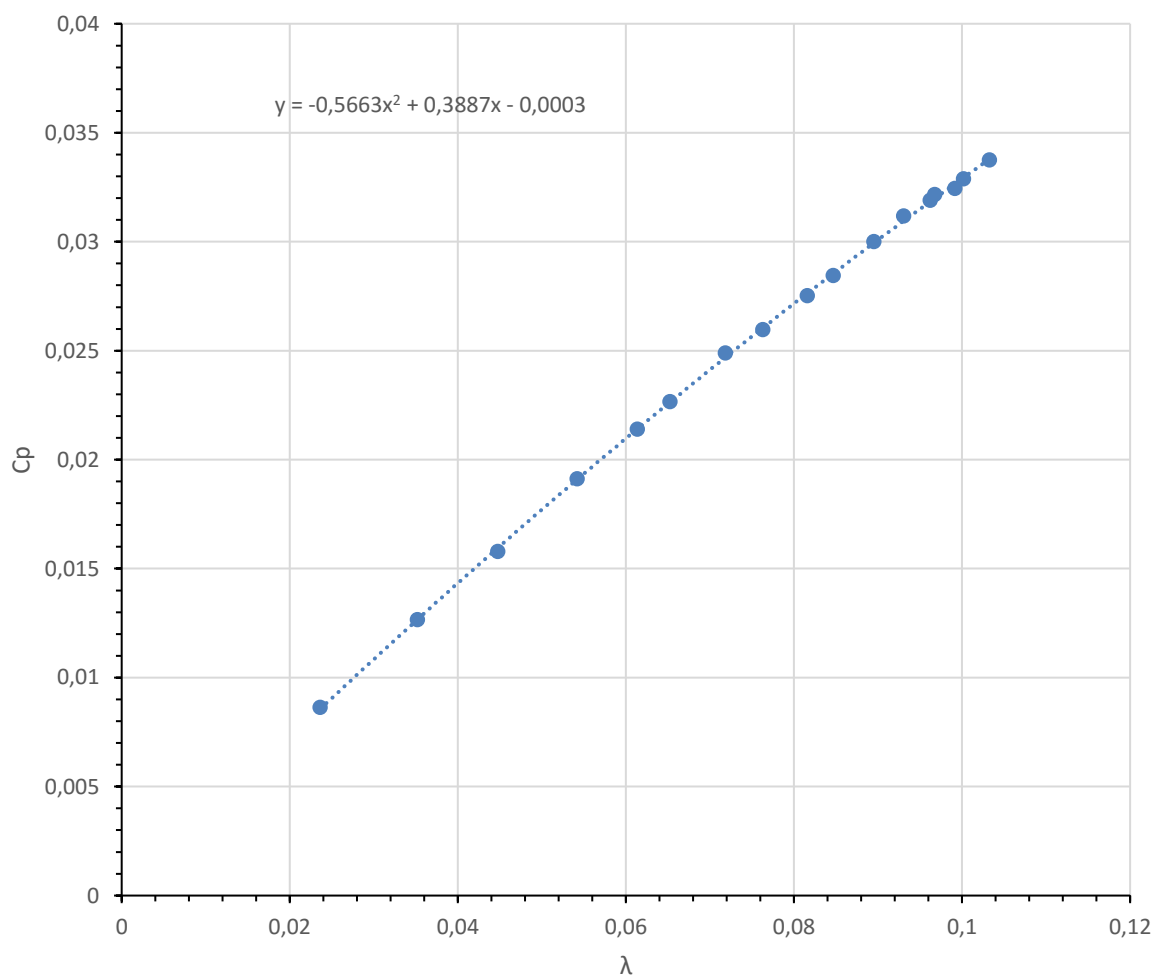


Figura 11.3: Curva de potencia extractor comercial sin succión a 10,40 m/s de viento (Túnel a 16Hz)

11.3 Curva de potencia a 11,00 m/s (Túnel 17Hz)

Tabla 11.3: Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,00 m/s de viento (Túnel a 17Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,34416	0,00763	-0,21396	10,35	10	6,07	57,95	10,94	0,8864	0,1462	0,0270	0,0915
2	0,34377	0,00595	-0,21642	10,62	10	5,91	56,48	10,93	0,8895	0,1468	0,0264	0,0893
3	0,34535	0,00342	-0,22079	10,87	10	5,78	55,21	10,96	0,8968	0,1480	0,0258	0,0870
4	0,34387	0,00322	-0,22206	11,24	10	5,59	53,36	10,94	0,9011	0,1487	0,0253	0,0843
5	0,34435	0,00034	-0,22631	11,58	10	5,43	51,83	10,95	0,9066	0,1496	0,0246	0,0818
6	0,34528	-0,00022	-0,22778	11,66	10	5,39	51,44	10,96	0,9102	0,1502	0,0244	0,0811
7	0,34090	-0,00191	-0,23042	12,07	10	5,21	49,71	10,88	0,9141	0,1508	0,0243	0,0789
8	0,34319	-0,00433	-0,23489	12,64	10	4,97	47,47	10,92	0,9222	0,1522	0,0231	0,0751
9	0,34277	-0,00711	-0,23991	13,20	10	4,76	45,45	10,92	0,9312	0,1537	0,0224	0,0720
10	0,34543	-0,00878	-0,24269	13,64	10	4,61	44,00	10,97	0,9356	0,1544	0,0215	0,0693
11	0,34512	-0,01150	-0,24595	14,20	10	4,43	42,26	10,96	0,9378	0,1547	0,0207	0,0666
12	0,34644	-0,01390	-0,25101	14,95	10	4,20	40,13	10,99	0,9484	0,1565	0,0197	0,0631
13	0,34465	-0,01649	-0,25458	16,11	10	3,90	37,25	10,95	0,9523	0,1571	0,0186	0,0588
14	0,34348	-0,01968	-0,25904	17,49	10	3,59	34,30	10,93	0,9574	0,1580	0,0173	0,0542
15	0,34554	-0,02559	-0,26600	18,65	10	3,37	32,17	10,97	0,9616	0,1587	0,0161	0,0507
16	0,34474	-0,03652	-0,28046	21,57	10	2,91	27,81	10,95	0,9758	0,1610	0,0142	0,0439
17	0,34606	-0,04347	-0,29128	31,02	10	2,03	19,34	10,98	0,9912	0,1636	0,0100	0,0304

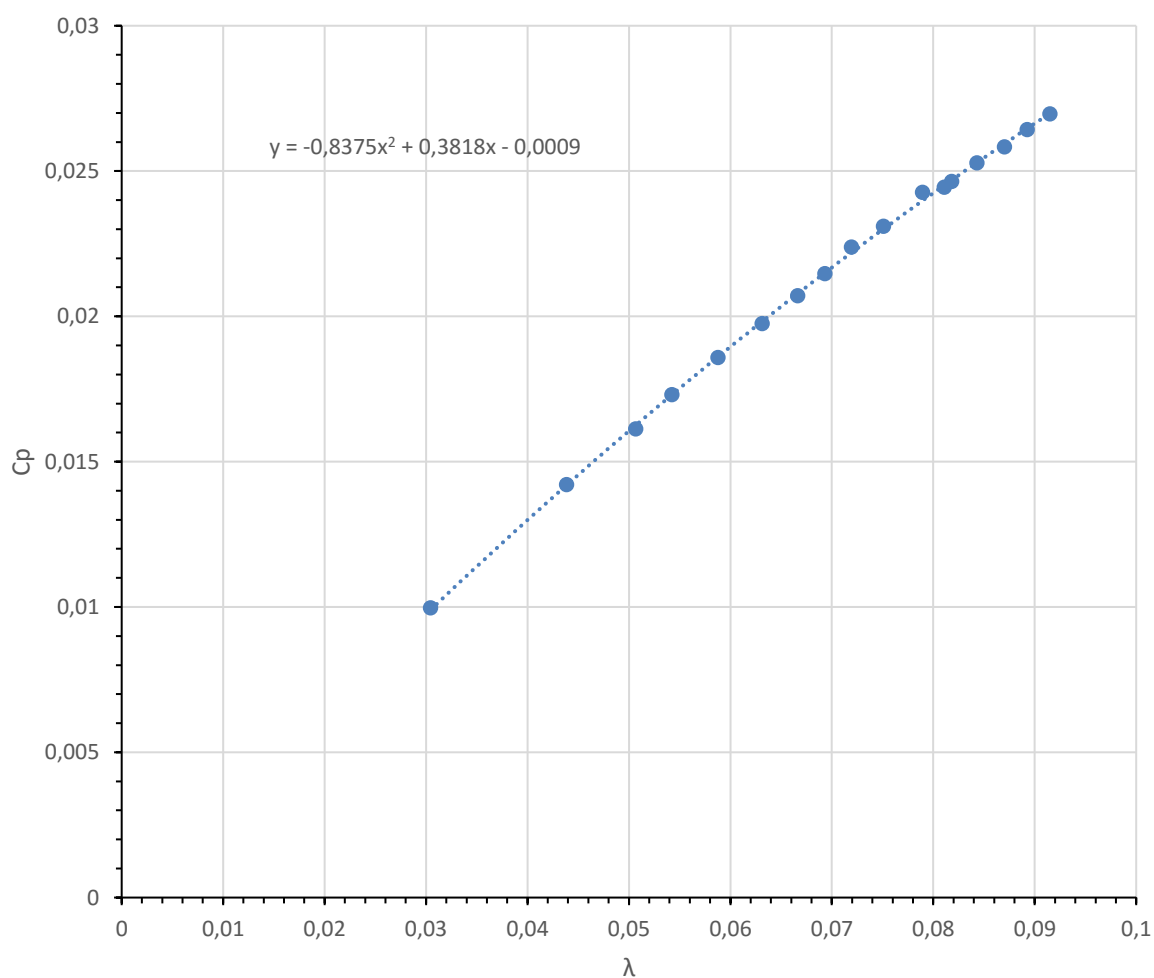


Figura 11.4: Curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,00 m/s de viento (Túnel a 17Hz)

11.4 Curva de potencia a 11,80 m/s (Túnel 18Hz)

Tabla 11.4: Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,80 m/s de viento (Túnel a 18Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,38769	0,00768	-0,22220	9,31	10	6,75	64,47	11,77	0,9195	0,1517	0,0250	0,0946
2	0,38688	0,00686	-0,22495	9,54	10	6,58	62,87	11,76	0,9272	0,1530	0,0247	0,0924
3	0,38836	0,00523	-0,22675	9,66	10	6,50	62,09	11,79	0,9279	0,1531	0,0242	0,0910
4	0,38657	0,00286	-0,23040	10,08	10	6,23	59,50	11,75	0,9330	0,1539	0,0235	0,0875
5	0,38707	0,00110	-0,23356	10,33	10	6,08	58,06	11,76	0,9386	0,1549	0,0230	0,0853
6	0,38714	-0,00056	-0,23787	10,66	10	5,90	56,30	11,76	0,9492	0,1566	0,0226	0,0827
7	0,38446	-0,00473	-0,24453	11,08	10	5,67	54,14	11,71	0,9592	0,1583	0,0222	0,0799
8	0,38731	-0,00755	-0,24992	11,93	10	5,27	50,28	11,77	0,9695	0,1600	0,0206	0,0738
9	0,38853	-0,01138	-0,25514	12,42	10	5,06	48,31	11,79	0,9750	0,1609	0,0198	0,0708
10	0,38730	-0,01367	-0,25841	13,17	10	4,77	45,57	11,77	0,9790	0,1615	0,0188	0,0669
11	0,38582	-0,01793	-0,26418	13,85	10	4,54	43,33	11,74	0,9850	0,1625	0,0182	0,0638
12	0,38587	-0,02143	-0,26936	14,91	10	4,21	40,24	11,74	0,9917	0,1636	0,0170	0,0592
13	0,38734	-0,02776	-0,27882	16,24	10	3,87	36,95	11,77	1,0043	0,1657	0,0157	0,0543
14	0,38624	-0,03223	-0,28474	17,94	10	3,50	33,44	11,75	1,0100	0,1667	0,0143	0,0492
15	0,38659	-0,03825	-0,29309	20,25	10	3,10	29,63	11,75	1,0194	0,1682	0,0128	0,0436
16	0,38955	-0,04798	-0,30682	22,74	10	2,76	26,39	11,81	1,0354	0,1708	0,0114	0,0386
17	0,38836	-0,05631	-0,31538	28,17	10	2,23	21,30	11,79	1,0363	0,1710	0,0093	0,0312

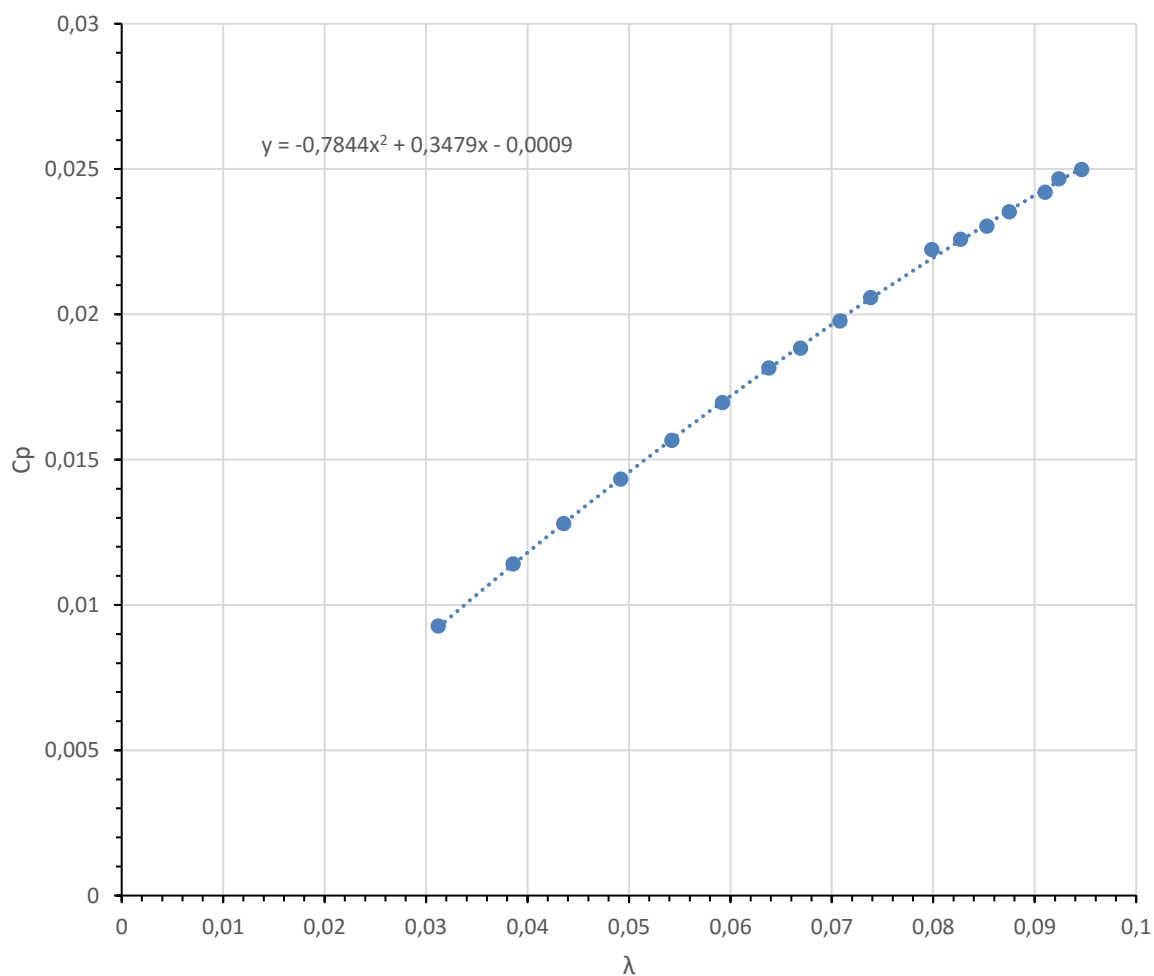


Figura 11.5: Curva de potencia extractor comercial sin succión a 11,80 m/s de viento (Túnel a 18Hz)

11.5 Curva de potencia a 13,00 m/s (Túnel 19Hz)

Tabla 11.5: Resultados curva de potencia extractor comercial sin succión a 13,00 m/s de viento (Túnel a 19Hz)

n	Pitot (V)	Célula 1 (V)	Célula 2 (V)	Tiempo promedio (s)	Vueltas rotor	Velocidad angular (rad/s)	Velocidad angular (rpm)	Velocidad aire (m/s)	Fuerza Equivalente (N)	Par (N.m)	CP	λ (TSR)
1	0,43375	0,02188	-0,21335	7,75	10	8,11	77,45	12,65	0,9409	0,1552	0,0247	0,1058
2	0,43099	0,02150	-0,21596	7,88	10	7,97	76,11	12,60	0,9498	0,1567	0,0248	0,1044
3	0,43284	0,01750	-0,21994	8,10	10	7,75	74,04	12,64	0,9498	0,1567	0,0240	0,1012
4	0,43126	0,01560	-0,22390	8,42	10	7,46	71,23	12,61	0,9580	0,1581	0,0234	0,0976
5	0,43190	0,01368	-0,22860	8,65	10	7,26	69,34	12,62	0,9691	0,1599	0,0230	0,0949
6	0,43265	0,01133	-0,23201	8,83	10	7,11	67,92	12,63	0,9734	0,1606	0,0226	0,0929
7	0,43071	0,00827	-0,23685	9,08	10	6,92	66,08	12,60	0,9805	0,1618	0,0223	0,0906
8	0,43243	0,00359	-0,24466	9,54	10	6,59	62,89	12,63	0,9930	0,1638	0,0213	0,0861
9	0,43336	0,00034	-0,24853	9,94	10	6,32	60,38	12,65	0,9955	0,1643	0,0204	0,0825
10	0,42930	-0,00373	-0,25503	10,61	10	5,92	56,57	12,57	1,0052	0,1659	0,0197	0,0778
11	0,42810	-0,00923	-0,26413	11,48	10	5,47	52,26	12,55	1,0196	0,1682	0,0186	0,0720
12	0,42804	-0,01526	-0,27361	12,54	10	5,01	47,85	12,54	1,0334	0,1705	0,0172	0,0659
13	0,42973	-0,02132	-0,28089	13,49	10	4,66	44,49	12,58	1,0383	0,1713	0,0160	0,0611
14	0,42881	-0,02793	-0,29010	15,15	10	4,15	39,61	12,56	1,0487	0,1730	0,0144	0,0545
15	0,42936	-0,03729	-0,30080	18,44	10	3,41	32,54	12,57	1,0541	0,1739	0,0119	0,0447
16	0,42984	-0,05438	-0,32558	23,69	10	2,65	25,32	12,58	1,0848	0,1790	0,0095	0,0348
17	0,42940	-0,07145	-0,34331	36,93	10	1,70	16,25	12,57	1,0875	0,1794	0,0061	0,0223

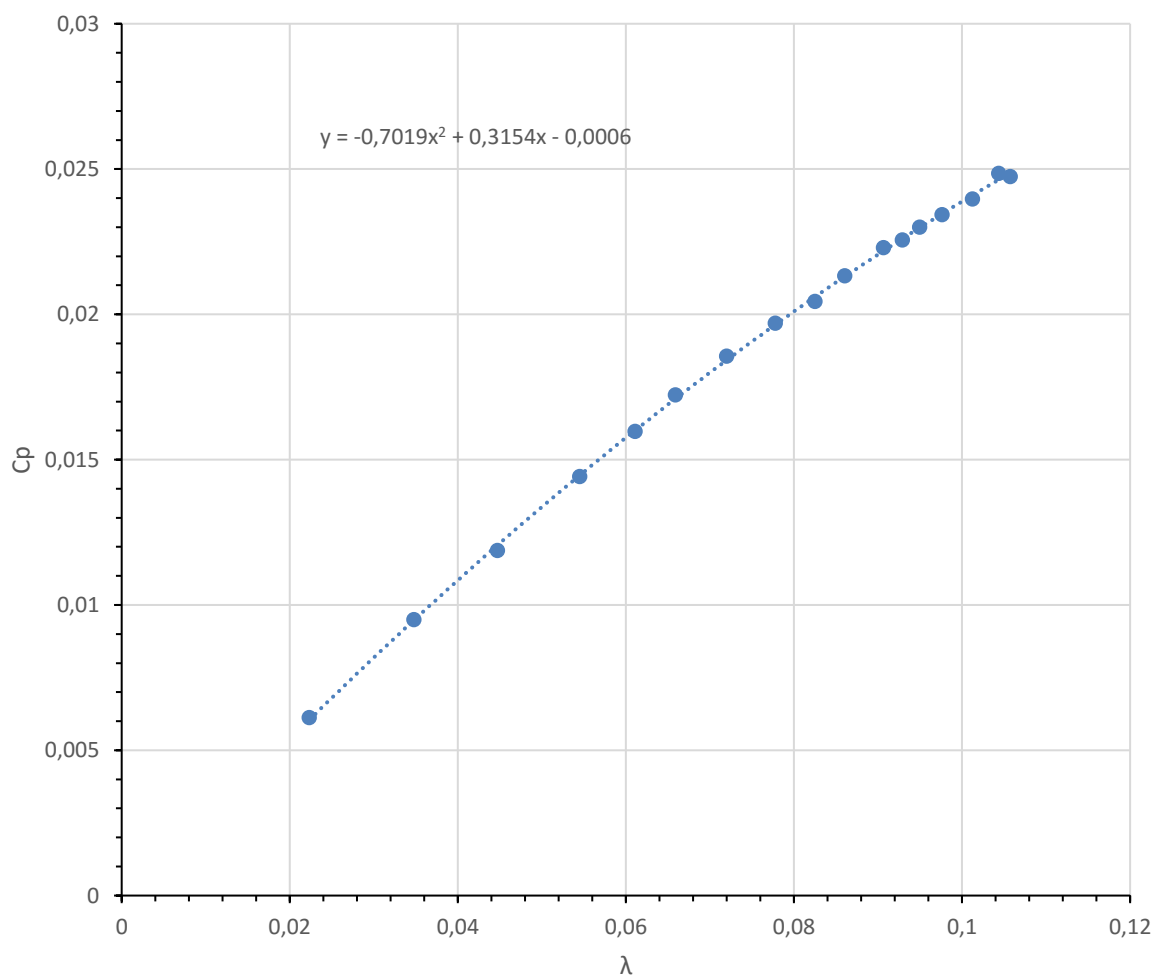


Figura 11.6: Curva de potencia extractor comercial sin succión a 13,00 m/s de viento (Túnel a 19Hz)

11.6 Conjunto curvas de potencia sin extracción

En el presente punto se representan las anteriores curvas de potencia obtenidas en el ensayo del *extractor comercial sin succión* en un mismo gráfico de dispersión. Este conjunto de curvas se representa en la Figura 11.7.

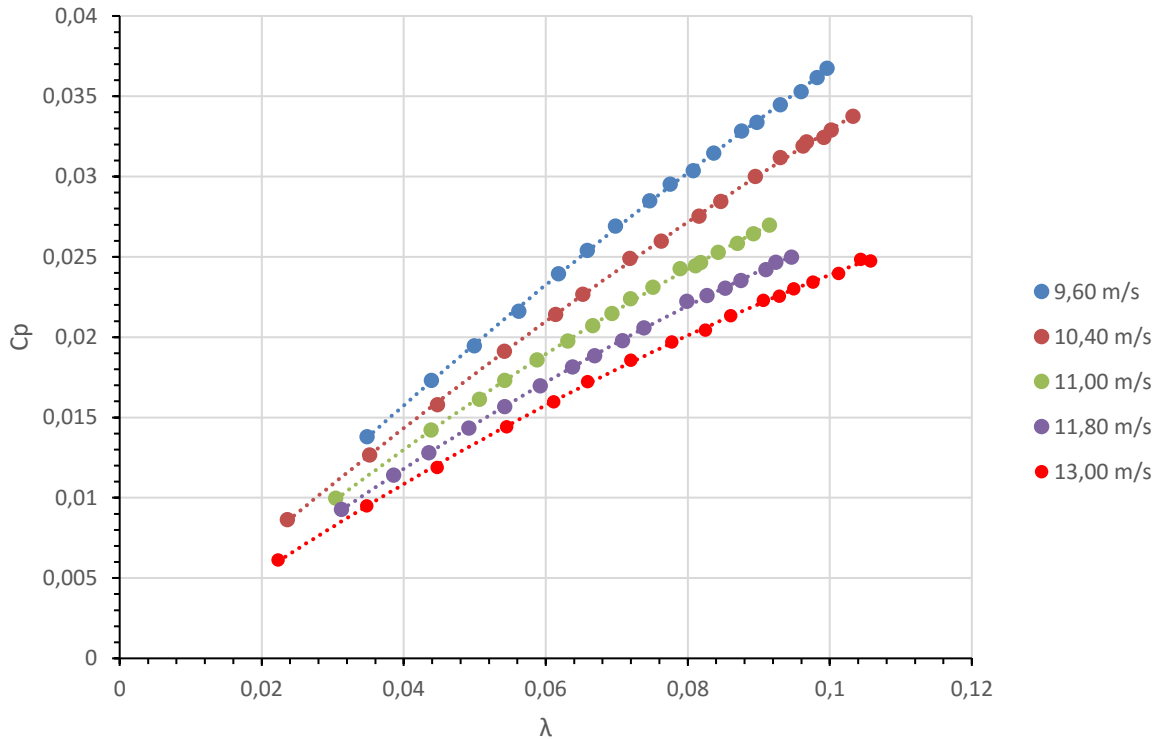


Figura 11.7: Conjunto de curvas de potencia del extractor comercial sin succión a diferentes velocidades de viento

11.7 Comparativa entre los diferentes ensayos

Si se comparan los resultados obtenidos en los ensayos del extractor comercial, el extractor modificado (con los perfiles de ala instalados) y el extractor comercial donde se le impide la capacidad de extracción, concretamente las figuras 7.6, 9.6 y 11.7 respectivamente, obtenemos la Figura 11.8 siguiente.

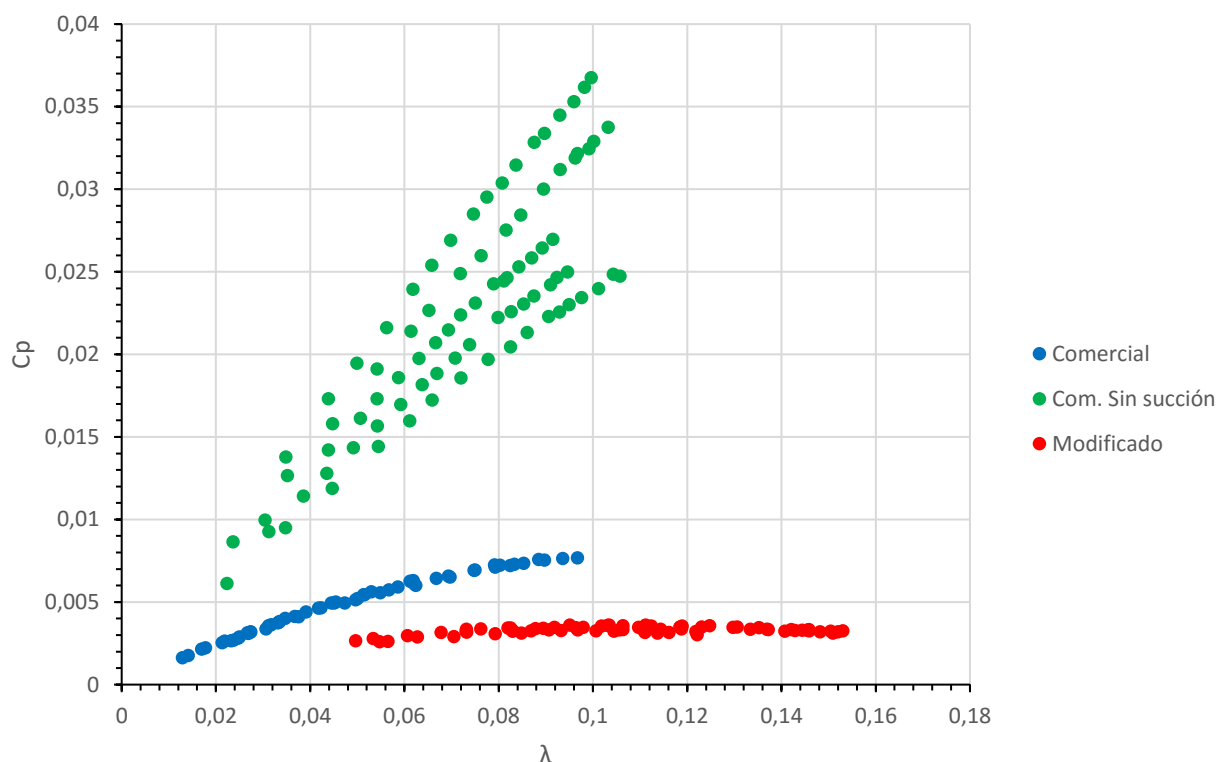


Figura 11.8: Comparativa de curvas de potencia experimentales entre extractor comercial, extractor modificado y extractor comercial sin succión

En la figura se puede observar un claro incremento de la eficiencia energética en el extractor comercial cuando se le ha eliminado la capacidad de extracción, y a pesar de que no se ha podido entrar en detalle en la comprensión del fenómeno físico que actúa, si permiten estos resultados confirmar la 2ª hipótesis planteada en el punto 9.7 y que por lo tanto los efectos que produce la extracción del rotor son significativos y afectan negativamente a la capacidad de conversión de la energía eólica en mecánica.

Por otro lado, ya no se ha tratado de ensayar una configuración del extractor con perfiles de ala y eliminando la succión puesto que sería un planteamiento contrario entre las funciones por las que está pensado el equipo.

En último lugar, para realizar una estimación de la cantidad de energía que se podría generar por los extractores en el caso de que estos se tratasen de convertir a generadores eólicos de electricidad, se empleará un valor de CP promedio entre la curva obtenida en el extractor comercial y las curvas obtenidas con el extractor comercial sin succión.

Esto se debe a que, una vez los extractores instalados, la capacidad de succión depende de la longitud de las canalizaciones de la edificación, por lo que en el caso de una canalización de longitud infinita, la succión sería nula. De forma que, cuanto mayor longitud tengan las canalizaciones de aire del edificio, más se aproximará a este planteamiento.

Puesto que en el momento actual, el proyectista desconoce las instalaciones y las rutas que siguen las conducciones de aire el valor de CP con el que se realizará la previsión será de 0,015. Tanto este valor de CP como el estudio eólico realizado (distinto a la ubicación del edificio) presentaran desviaciones de la realidad, debería permitir al promotor tener un orden de magnitud de la capacidad de generación del extractor y permitirle tomar una decisión al respecto sobre la viabilidad del proyecto.

En los siguientes puntos se realizará una ingeniería básica de la instalación que se debería realizar en el edificio y de los elementos principales necesarios. Al tratarse de una ingeniería básica, no se entrará en detalle del dimensionado de equipos, instalación y elementos de seguridad puesto que quedan fuera del alcance del presente proyecto y los cuales deberían ser definidos en un proyecto de instalación de los generadores en el caso que se decida dicha conversión.

12 Ingeniería básica de la instalación de generación

12.1 Potencial eléctrico de generación

Debido a lo expuesto en el anterior punto, aquí se tratará de obtener la capacidad que tendrían 14 extractores (número de extractores determinados mediante la azotea del edificio en la figura 2.1) empleando un valor de CP de 0,015 y el estudio eólico realizado en el punto 5 del presente proyecto.

Por otro lado, en esta estimación se plantea que la velocidad de conexión de los extractores, una vez convertidos a generadores eléctricos, sea de a partir de 4 m/s y de desconexión a partir de 22 m/s. Estos valores son puntos de conexión y desconexión habituales en los generadores eólicos comerciales. No obstante es necesario añadir que en los ensayos realizados en los extractores no había sido posible que estos empezaran a rotar a estas velocidades, por lo que en el caso de querer convertir los extractores a generadores, se debería verificar que permita conectar el extractor a estas velocidades. De no ser posible, la estimación aquí realizada se vería altamente mermada debido a que la potencia generada por el extractor sigue una ley cúbica con la velocidad del viento y los valores de baja velocidad son las que más horas se presentan a lo largo del año en este entorno climático.

En referencia a estos datos, se empleará la Tabla 5.1 obtenida en el estudio eólico. En ella se añadirán los siguientes campos y calculados de la siguiente forma y obtenemos la Tabla 12.1:

- Potencia (W): corresponde a la potencia mecánica extraída por el extractor, en función de la CP (0,015) y del área frontal (0,0428m²) a la velocidad del aire promedio v del rango calculado (marca de clase), tal como presenta la Ec.12.1

$$Potencia(W) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A_F \cdot CP \quad (Ec.12.1)$$

- Neto (W): Corresponde a la Potencia (W) multiplicada por la probabilidad obtenida mediante la distribución de Rayleigh de que sople esa velocidad de viento.
- Energía producida (Wh): este campo corresponde al producto de Neto (W) por el total de hora anuales, incorporando un factor de eficiencia en la conversión mecánica a eléctrica del 90%.
- A continuación se definen una serie de campos condicionales donde se define si el generador estaría en funcionamiento o no según las velocidades de conexión y desconexión planteadas, 4 y 22 m/s respectivamente.

Tabla 12.1: Generación eléctrica por rango de velocidades

Nº	Intervalo velocidades (m/s)		Total horas anuales	Probabilidad (Dist. Rayleigh)	Probabilidad Acumulada	Potencia (W)	Neto (W)	Energía producida (Wh)	Funcionamiento del generador? 0=No 1=Si	Tiempo de funcionamiento (h)	Generación (Wh)
	Lim. Inferior	Lim. Superior									
1	0,00	0,50	20	4,38%	1,10%	0,0000	0,0000	0,00	0	0	0,00
2	0,51	1,01	164	8,56%	4,2%	0,0002	0,0000	0,00	0	0	0,00
3	1,02	1,52	420	12,16%	9,73%	0,0008	0,0001	0,04	0	0	0,00
4	1,53	2,03	696	14,99%	16,69%	0,0022	0,0003	0,21	0	0	0,00
5	2,04	2,54	958	16,91%	24,86%	0,0047	0,0008	0,69	0	0	0,00
6	2,55	3,05	874	17,90%	33,78%	0,0086	0,0015	1,21	0	0	0,00
7	3,06	3,56	743	17,99%	42,97%	0,0142	0,0026	1,71	0	0	0,00
8	3,57	4,07	651	17,31%	52,00%	0,0219	0,0038	2,22	0	0	0,00
9	4,08	4,58	595	16,02%	60,52%	0,0319	0,0051	2,74	0	0	0,00
10	4,59	5,09	508	14,31%	68,27%	0,0445	0,0064	2,91	1	508	2,91
11	5,10	5,60	480	12,37%	75,08%	0,0602	0,0074	3,21	1	480	3,21
12	5,61	6,11	509	10,36%	80,88%	0,0791	0,0082	3,75	1	509	3,75
13	6,12	6,62	300	8,41%	85,66%	0,1016	0,0085	2,31	1	300	2,31
14	6,63	7,13	259	6,64%	89,49%	0,1280	0,0085	1,98	1	259	1,98
15	7,14	7,64	237	5,10%	92,47%	0,1586	0,0081	1,72	1	237	1,72
16	7,65	8,15	215	3,81%	94,73%	0,1937	0,0074	1,43	1	215	1,43
17	8,16	8,66	147	2,77%	96,40%	0,2337	0,0065	0,86	1	147	0,86
18	8,67	9,17	155	1,96%	97,59%	0,2789	0,0055	0,76	1	155	0,76
19	9,18	9,68	126	1,35%	98,43%	0,3295	0,0044	0,50	1	126	0,50
20	9,69	10,19	113	0,91%	99,00%	0,3859	0,0035	0,36	1	113	0,36
21	10,20	10,70	107	0,59%	99,37%	0,4484	0,0027	0,26	1	107	0,26
22	10,71	11,21	105	0,38%	99,62%	0,5173	0,0020	0,19	1	105	0,19
23	11,22	11,72	61	0,24%	99,77%	0,5929	0,0014	0,08	1	61	0,08
24	11,73	12,23	45	0,14%	99,87%	0,6755	0,0010	0,04	1	45	0,04
25	12,24	12,74	40	0,08%	99,92%	0,7655	0,0007	0,02	1	40	0,02
26	12,75	13,25	47	0,05%	99,96%	0,8632	0,0004	0,02	1	47	0,02
27	13,26	13,76	45	0,03%	99,98%	0,9688	0,0003	0,01	1	45	0,01
28	13,77	14,27	25	0,02%	99,99%	1,0828	0,0002	0,00	1	25	0,00
29	14,28	14,78	18	0,01%	99,99%	1,2053	0,0001	0,00	1	18	0,00
30	14,79	15,29	13	0,00%	100,00%	1,3367	0,0001	0,00	1	13	0,00
31	15,30	15,80	16	0,00%	100,00%	1,4773	0,0000	0,00	1	16	0,00
32	15,81	16,31	16	0,00%	100,00%	1,6275	0,0000	0,00	1	16	0,00
33	16,32	16,82	7	0,00%	100,00%	1,7875	0,0000	0,00	1	7	0,00
34	16,83	17,33	9	0,00%	100,00%	1,9577	0,0000	0,00	1	9	0,00
35	17,34	17,84	4	0,00%	100,00%	2,1384	0,0000	0,00	1	4	0,00
36	17,85	18,35	1	0,00%	100,00%	2,3298	0,0000	0,00	1	1	0,00
37	18,36	18,86	10	0,00%	100,00%	2,5324	0,0000	0,00	1	10	0,00
38	18,87	19,37	4	0,00%	100,00%	2,7463	0,0000	0,00	1	4	0,00
39	19,38	19,88	4	0,00%	100,00%	2,9720	0,0000	0,00	1	4	0,00
40	19,89	20,39	5	0,00%	100,00%	3,2097	0,0000	0,00	1	5	0,00
41	20,40	20,90	3	0,00%	100,00%	3,4598	0,0000	0,00	1	3	0,00
42	20,91	21,41	1	0,00%	100,00%	3,7225	0,0000	0,00	1	1	0,00
43	21,42	21,92	0	0,00%	100,00%	3,9982	0,0000	0,00	1	0	0,00
44	21,93	22,43	1	0,00%	100,00%	4,2872	0,0000	0,00	0	0	0,00
45	22,44	22,94	2	0,00%	100,00%	4,5897	0,0000	0,00	0	0	0,00
46	22,95	23,45	0	0,00%	100,00%	4,9062	0,0000	0,00	0	0	0,00
47	23,46	23,96	0	0,00%	100,00%	5,2370	0,0000	0,00	0	0	0,00
48	23,97	24,47	0	0,00%	100,00%	5,5822	0,0000	0,00	0	0	0,00
49	24,48	24,98	0	0,00%	100,00%	5,9423	0,0000	0,00	0	0	0,00
50	24,99	25,49	1	0,00%	100,00%	6,3176	0,0000	0,00	0	0	0,00
n=											8760

A continuación en la Tabla 12.2 se presenta un resumen de estos resultados obtenidos en las condiciones consideradas, siendo:

- El porcentaje anual de funcionamiento de los generadores
- La generación eléctrica por generador, correspondiente al sumatorio de la columna Generación (Wh) de la Tabla 12.1
- El número de generadores considerados
- Total de producción eléctrica por el conjunto de generadores

Tabla 12.2: Resultados anuales de generación eléctrica por el conjunto de generadores

RESULTADOS GENERACIÓN ELÉCTRICA EXTRACTORES COMERCIALES	
Funcionamiento de los extractores (%)	41,50
Generación eléctrica estimada por generador (Wh)	20,41
Nº de generadores	14
Total producción estimada (Wh)	285,78

Observando estos resultados obtenidos, se aprecia que la producción total estimada anual es de aproximadamente 285Wh en un rango de funcionamiento de los generadores de entre 4 y 22 m/s de velocidad de viento. De forma que, si repartimos uniformemente esta producción anual a lo largo de cada día del año (360 días) obtenemos que podríamos consumir aproximadamente 0,80 Wh diarios. Con estos valores de consumo diario tan limitados no permite pensar en algún equipo que pueda aprovecharse esta generación eléctrica, puesto que como ejemplo, una lámpara led esta alrededor de 7Wh de consumo eléctrico.

Por otro lado, y como se ha comentado en anteriores ocasiones, es muy importante asegurar el funcionamiento del extractor por debajo de los 10 m/s puesto que en los ensayos presentaba serias dificultades a empezar el movimiento aplicando la mínima fuerza de frenado.

Por estos motivos expuestos y resumidos a continuación, el proyectista estima inviable el proyecto a falta de la aprobación del promotor.

- Consumo optimista eléctrico diario de 0,80 Wh
- Elevados costes de instalación frente al beneficio que aportaría a largo plazo.
- Largo periodo de amortizamiento de la instalación

13 Conclusiones del proyecto

La realización del presente proyecto de Final de Máster, desde el punto de vista académico, ha resultado en una integración de conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera universitaria tanto en conocimientos adquiridos en el Grado como en el Máster.

Principalmente, se ha profundizado en conocimientos del área de la Mecánica de Fluidos y en conceptos que, en primera instancia parecen abstractos, pero que al final se les puede ver el encanto. Por otro lado, resulta interesante comprender estos mecanismos físicos tratados en las bases teóricas del proyecto puesto que se puede apreciar que estos fenómenos se producen en multitud de situaciones cotidianas, como puede ser en el deporte, como lo comentado sobre las pelotas de golf; entendiéndose que al final muchos elementos tienen más ciencia de la que a priori aparentan.

En siguiente lugar, poder formar parte de este proyecto ha sido una experiencia única puesto que es poco común elaborar proyectos con un claro enfoque a la investigación sin disponer del equipamiento, medios y recursos necesarios, los cuales en este caso se ha podido culminar gracias a estos recursos proporcionados por la Universidad.

Finalmente, ha sido posible adquirir mayores conocimientos referentes al área de la energía eólica, donde se espera cada vez más un incremento del consumo eléctrico procedente de energías renovables, como es el funcionamiento y bases teóricas; algunas de ellas ya tratadas en el Máster pero en las cuales se ha podido profundizar y llegar a mayor detalle de conocimiento.

Desde el punto de vista técnico, me habría gustado personalmente que el proyecto hubiese sido satisfactorio en cuanto a la eficiencia energética se refiere y que el equipo hubiese permitido aportar una mayor capacidad de conversión energética y poder ver en un futuro la implantación realizada. No obstante, con la realización de este proyecto, permitirá al promotor conocer la capacidad de estos extractores y sus limitaciones referentes a la generación eléctrica.

14 Propuestas de mejora en caso de futuros proyectos

En el siguiente punto se indicaran una serie de puntuaciones que se proponen realizar, tanto en el caso de tratar de ensayar el mismo extractor, modificado a un generador eléctrico, como para otros proyectos de características similares:

- Realizar u obtener mediciones de velocidad de viento del propio emplazamiento, de forma que se contemple en los datos los efectos de la orografía y obstáculos en el terreno. Esto permitiría obtener valores exactos de la realidad y de la capacidad de generación, puesto que como ya se ha visto, la potencia eólica está en función de una ley cúbica con la velocidad del viento.
- Modificar el extractor a generador eólico de electricidad y ensayarlo para obtener curvas reales de velocidad del viento respecto a la potencia eléctrica generada.
- Tratar de evaluar el comportamiento del generador eléctrico a velocidades de funcionamiento típicas en la ubicación a la cual se va a instalar.
- Analizar, verificar o estudiar una metodología en la que el generador pueda conectarse a partir de 4 m/s o menor. En el caso actual no era posible y con este estudio se aproximaría en mayor medida a la estimación de generación eléctrica planteada.
- Sería recomendable la realización de las estimaciones de la capacidad de generación a nivel, como mínimo, mensual con los datos de las características del viento propias de la ubicación de implantación.

15 Referencias bibliográficas

- [1] UNE-EN 61400-2:2015 Aerogeneradores. Parte 2: Aerogeneradores pequeños.
- [2] J.M Escudero López, "Manual de energía Eólica" (colección de energías renovables), 2ª Ed. Corregida, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2008, ISBN: 978-84-8476-363-3, pp. 65-83.
- [3] Antonio Creus Solé, "Aerogeneradores", 1ª Ed. Ediciones CEYSA, 2008, ISBN: 978-84-96960-21-3 pp. 39-60.
- [4] Frank M. White "Mecánica de Fluidos", 5ª Ed. Madrid: McGraw-Hill, 2004, ISBN: 84-481-4076-1 pp. 437-480; 725-769
- [5] "Gestión y Explotación de fuentes de Energía", apuntes de asignatura del Máster en Ingeniería Industrial, Universitat Rovira i Virgili.
- [6] Martin O. L. Hansen "Aerodynamics of Wind Turbines". 2nd Edition. London: EARTHSCAN, 2008, ISBN: 978-1-84407-438-9 pp. 7-18; 27-32; 52.
- [7] ECOMMFIT "Flow and Turbulence Analysis of the 4-Winds Open Jet Tunnel". Tarragona: ETSEQ, 2012.
- [8] P. Fernández Díez (2000-15). "Biblioteca sobre ingeniería energética, 2. Fundamentos Aerodinámicos de las Máquinas Eólicas". Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>
- [9] Ning Qin. "Wind Tunnel and Numerical Study of a Small Vertical Axis Wind Turbine". University of Sheffield (U.K). 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 7-10 January 2008, Reno, Nevada.
- [10] Ning Quin. "Unsteady Flow Simulation and Dynamic Stall around Vertical Axis Wind Turbine Blades". University of Sheffield (U.K). 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 7-10 January 2008, Reno, Nevada.
- [11] Robert L. Mott. "Mecánica de Fluidos", 6ª Edición. México: PEARSON Educación, 2006, ISBN: 970-26-0805-8

Anexo A: Errores experimentales en las curvas de potencia

Todas las medidas experimentales vienen afectadas de una imprecisión inherente al proceso de medida. Puesto que en éste se trata, básicamente, de comparar con un patrón y esta comparación se hace mediante el útil que permita comparar dicha magnitud física, la medida dependerá de la mínima cantidad que este sea capaz de medir.

Debido a esto, permite afirmar que las medidas físicas son siempre "incorrectas". Dicho de una manera más adecuada: si llamamos error a la diferencia que existe entre la medida y el valor "verdadero" de la magnitud, siempre existirá este error. Este tipo de error se le llama "error intrínseco" o inevitable.

Por otro lado, el valor de las magnitudes físicas se puede obtener de manera directa o bien indirecta a partir de vínculos entre las magnitudes a partir de fórmulas o leyes. Por lo tanto, debe admitirse que aparte del error intrínseco, el proceso experimental lleva en sí otras imperfecciones que hacen que resulte imposible llegar a conocer el valor exacto de ninguna magnitud física. De este modo, aunque es imposible, en la práctica, encontrar el valor "verdadero" o "exacto", el objetivo de lo detallado en el presente anexo es establecer los límites dentro de los cuales estamos seguros de que se encuentra dicho valor obteniendo la cota de error.

Puesto que en el proceso experimental que se ha realizado para obtener las curvas de potencia, la parte que se puede poner más en duda, es el procedimiento manual que se ha desarrollado en el cómputo del tiempo en que tardaba el rotor en realizar las diez vueltas y de esta forma determinar la velocidad angular del extractor; es en la que nos focalizaremos en tratar de acotar el error cometido y la propagación de éste a los parámetros CP y TSR, obteniendo finalmente las cotas de error en las curvas de potencia.

Por lo tanto, conociendo la precisión del cronómetro utilizado en los ensayos del laboratorio siendo de $\delta t=0,01s$, planteando un error humano a la hora de parar el tiempo al momento de que el rotor alcanza las 10 vueltas de $\delta h=1/4$ de vuelta y conociendo que la velocidad angular es la relación entre el número de vueltas y el tiempo que tardan en realizarse podemos determinar la propagación de errores en cocientes, la cual se establece en la Ec. A.1:

$$q = \frac{x}{y} \Rightarrow \frac{\delta q}{|q|} \approx \frac{\delta x}{|x|} + \frac{\delta y}{|y|} \quad (\text{Ec. A.1})$$

Por lo tanto, aplicando la ecuación anterior y redondeando a la primera cifra significativa, obtenemos que el error relativo a las medidas de velocidad angular corresponde a un valor de $\pm 0,2$ rad/s.

A continuación, este valor permite determinar la propagación del error en los parámetros de CP y TSR. Puesto que la única variable de estos dos parámetros que consideramos sometida a error experimental es la velocidad angular, siendo el resto de parámetros coeficientes y valores conocidos, podemos determinar el error asociado a los parámetros del coeficiente de potencia y Tip Speed Ratio aplicando las ecuaciones 6.3 y 6.4 respectivamente, indicadas en anteriores páginas.

Al obtener valores de CP y TSR relativamente próximos entre sí, una vez redondeado el error a la primera cifra significativa este se mantiene a lo largo de todos los puntos de las curvas obtenidas para cada tipo de configuración ensayada, obteniendo los errores relativos siguientes:

Tabla A.1: Error experimental en CP y TSR para las diferentes configuraciones ensayadas

Configuración Extractor	Error CP	Error TSR
Comercial	$\pm 0,0002$	$\pm 0,002$
Modificado	$\pm 0,0001$	$\pm 0,005$
Comercial sin succión	$\pm 0,0006$	$\pm 0,002$

Con la finalidad de que estos resultados sean más claros e intuitivos, se representan a continuación el conjunto de curvas obtenidas para los diferentes ensayos realizados (extractor comercial, extractor modificado y extractor sin succión) donde se han incluido barras de error las cuales establecen la cota de estos valores.

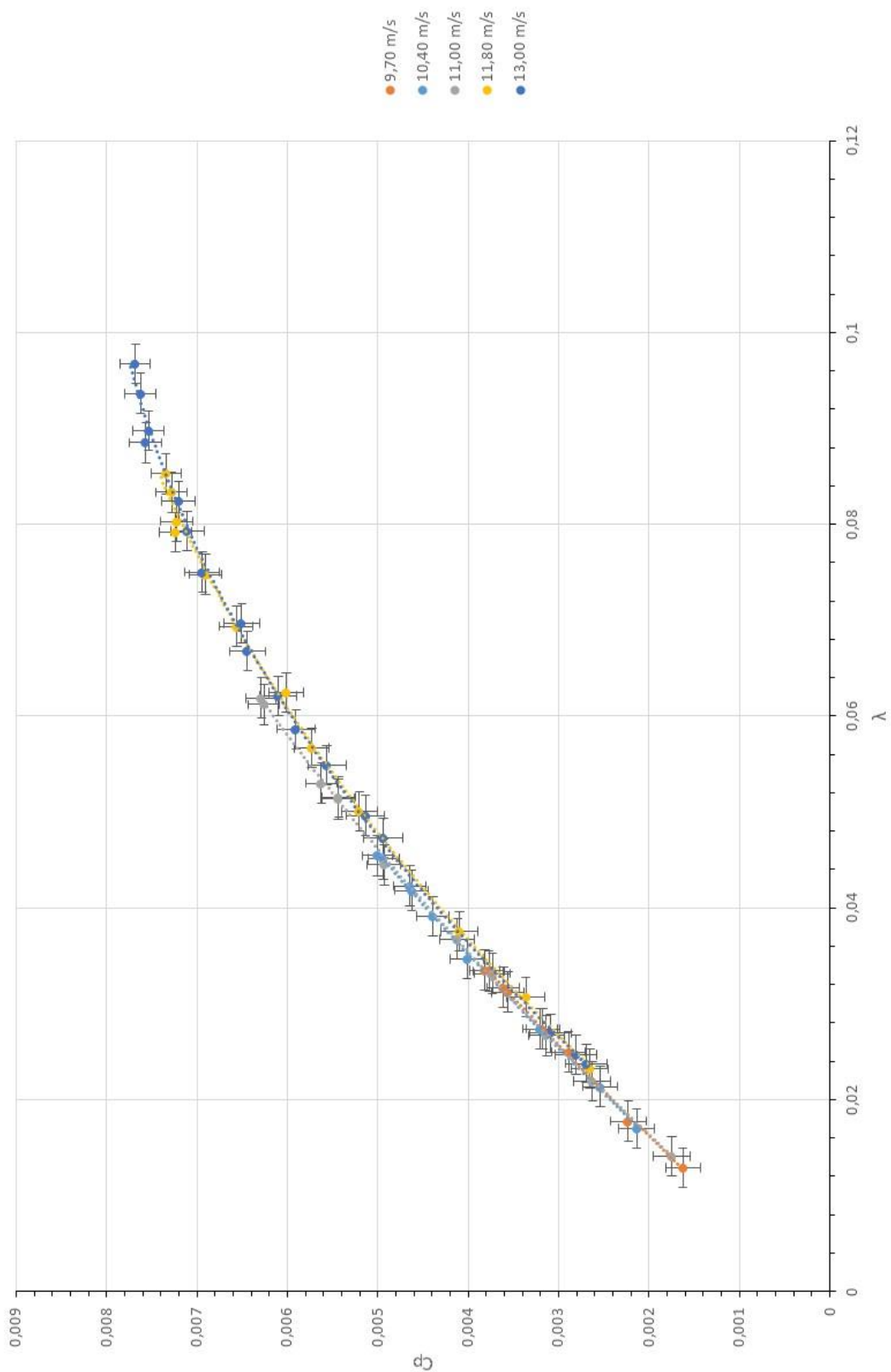


Figura A.1: Error en curvas experimentales del extractor comercial

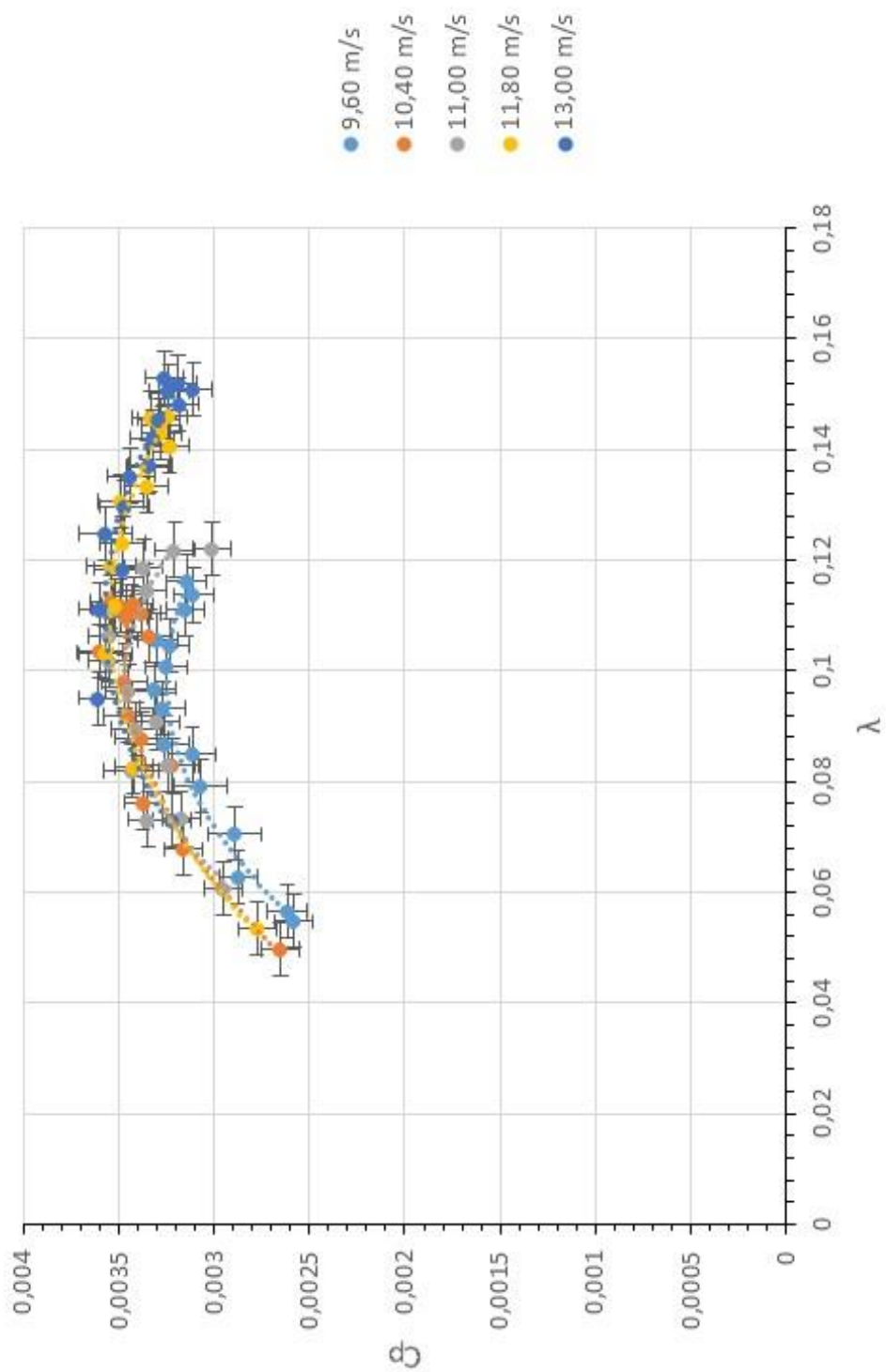


Figura A.2: Error en curvas experimentales del extractor modificado

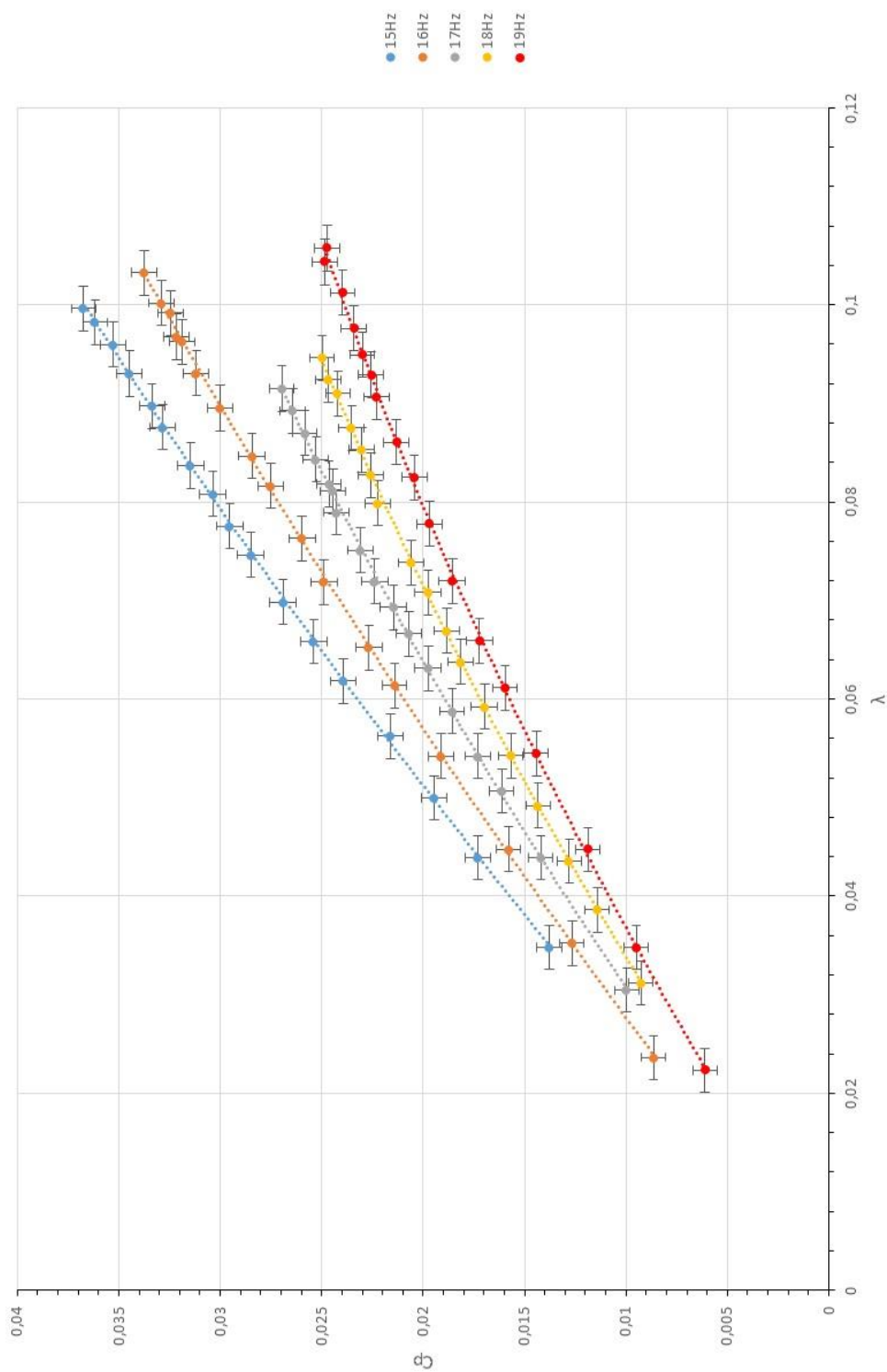


Figura A.3: Error en curvas experimentales del extractor comercial sin succión