



Trabajo Fin de Máster

Análisis sobre influencia de la temperatura y
densidad en los anemómetros de cazoletas

Autor/es

Félix Sáez-Benito Díaz

Director/es

Andrés Llombart Estopiñán

Universidad de Zaragoza / EINA

2014

ANÁLISIS SOBRE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DENSIDAD EN LOS ANEMÓMETROS DE CAZOLETAS

RESUMEN

El uso de la energía eólica para la producción de energía eléctrica es una tecnología prometedora y a la vez muy madura, que tiene una gran importancia dentro del escenario de generación de energía eléctrica. La actual situación de moratoria, hace que la optimización del rendimiento de los emplazamientos eólicos sea crucial y el principal objetivo. La velocidad del viento, es el parámetro más importante en el diseño de un parque, puesto que una mínima desviación en sus lecturas, puede provocar errores a lo largo de todo el proyecto eólico. Para ello se debe comenzar caracterizando precisamente el recurso eólico del parque.

Tras observar repetidamente los efectos producidos por la temperatura en diversos registros eólicos, se decide hacer hincapié sobre esta variable, para cuantificar las desviaciones producidas por la misma.

El objetivo principal de este estudio es analizar la influencia de la temperatura sobre las lecturas ofrecidas por los anemómetros de cazoletas. Para realizar este análisis, se ha contado con los registros tomados durante un año de una torre meteorológica y dos aerogeneradores, ambos provistos de sensores para caracterizar el viento del emplazamiento. Se realizaron análisis comparativos de los resultados ofrecidos por el anemómetro de cazoletas para cada sector de temperaturas, debido a que teóricamente es el más expuesto a este parámetro. También se estudiaron los efectos producidos en la curva de potencia de los aerogeneradores.

Los resultados ofrecen una clara dependencia de este parámetro, mostrándose ordenadamente según su clasificación. Las temperaturas frías obtendrían una tendencia positiva, donde las lecturas de velocidad del anemómetro de cazoletas serían más rápidas que la media de los registros. Contrariamente, las lecturas de viento para temperaturas cálidas mostrarían una tendencia negativa en sus registros.

Actualmente, esta variable es muy relevante y tenida en cuenta en los ensayos de calibración de los anemómetros. La prueba de ello se recoge en este informe donde se detalla su afección sobre dichos sensores.

Índice

ANÁLISIS SOBRE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y DENSIDAD EN LOS ANEMÓMETROS DE CAZOLETAS	2
RESUMEN	2
Lista de ilustraciones	4
Lista de Tablas	4
Lista de Gráficas	4
1. INTRODUCCIÓN	6
Antecedentes	6
1.1. Alcance y objetivos.....	9
2. MEMORIA.....	10
2.1. La velocidad del viento.....	10
2.1.1. El anemómetro.....	10
2.1.2. Calibración.....	13
2.2. Influencia en la medida de parámetros en campo	14
3. METODOLOGÍA.....	21
3.1. Registro de datos.....	21
3.2. Tratamiento de datos.....	23
3.2.1. Clasificación de datos	26
3.2.2. Aplicación del método	27
4. RESULTADOS	28
5. CONCLUSIONES	39
6. BIBLIOGRAFÍA	40
7. ANEXOS	42
7.1. Anexo Parque Walqa	42
7.2. Anexo densidad. Informe sobre las desviaciones producidas por la densidad. (Pindado, S., Sanz, A., & Wery, A. <i>Deviation of cup and propeller anemometer calibration. Results with air density</i>)	50
7.3. Métodos aplicados	53

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. EEM para cada sector de temperaturas	8
Ilustración 2. Diferencia de IT para cada sector de temperaturas en el anemómetro de cazoletas	9
Ilustración 3. Anemómetro de cazoletas	11
Ilustración 4. Anemómetro de hélice	11
Ilustración 5. Anemómetro sónico	12
Ilustración 6. Descripción del equipo del emplazamiento de Walqa. (Torre meteorológica y aerogenerador)	43
Ilustración 7. Modelos de anemómetros sometidos a estudio	50
Ilustración 8. Tendencia de los parámetros A y B de calibración (modelo A100 L2)	51
Ilustración 9. Tendencia de los parámetros A y B de calibración (modelo Thies Clima 4.3350)	51
Ilustración 10. Estimaciones de desviación de los parámetros A y B	52

Lista de Tablas

Tabla 1. Rango de valores de aerogenerador	13
Tabla 2. Porcentaje del intervalo de variación, de la velocidad del viento medida debido a una variación de la densidad de $\Delta p = 0,1 \text{ Kg /m}^3$, para los modelos de anemómetro analizados.....	17
Tabla 3. . Desviación de la AEP debido a las variaciones en las mediciones de velocidad del viento causadas por la fluctuación de la densidad del aire, $\Delta p = 0,05 \text{ Kg/m}^3$, y $\Delta p = 0,1 \text{ Kg/m}^3$, en función de la velocidad media anual del viento (4 m/s, 7 m/s).....	18
Tabla 4. Datos generales del parque de estudio.....	26
Tabla 5. Densidades medias de cada sector de temperaturas	36
Tabla 6. Variación en densidad frente a la media general de los datos	36
Tabla 7. Registro de velocidades medias bin a bin de cada sector	47
Tabla 8. Densidad media de cada sector de temperaturas (Walqa).....	48
Tabla 9. Variación en densidad de cada sector (Walqa)	48

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Curva de potencia de un aerogenerador	7
--	---

Gráfica 2. Fricción de un anemómetro de cazoletas en función de la temperatura y la velocidad de rotación	15
Gráfica 3. Ejemplo de una clasificación de datos de un aerogenerador	23
Gráfica 4. Proceso del tratamiento de datos	24
Gráfica 5. Datos brutos (Izquierda); Datos útiles (derecha)	25
Gráfica 6. Curva de potencia datos brutos (izquierda); datos útiles (derecha)	25
Gráfica 7. Sectorización de los datos de temperatura. (5 sectores y 3 sectores).....	26
Gráfica 8. Izquierda, rosa de viento torre meteorológica; Derecha, rosa de vientos aerogenerador	27
Gráfica 9. Rosa de viento y potencia datos brutos	28
Gráfica 10. Direcciones de viento de los datos erróneos (Izq. Anemo caz; Derecha. Anemo sónico)	29
Gráfica 11. Rosa de viento y potencia datos útiles	29
Gráfica 12. Distribución Weibull del emplazamiento	30
Gráfica 13. Sectorización por diferentes temperaturas	30
Gráfica 14. Clasificación en 3 sectores de temperatura	31
Gráfica 15. Recta de regresión del estudio	31
Gráfica 16. Relación general bin a bin entre sendos anemómetros.....	32
Gráfica 17. Relación bin a bin sector temperatura fría	33
Gráfica 18. Relación bin a bin sector temperatura media.....	33
Gráfica 19. Relación bin a bin sector temperatura alta	34
Gráfica 20. Diferencia bin a bin entre la comparativa general y cada sector de temperaturas (anemómetro de cazoletas) Parque estudio	35
Gráfica 21. Curva de potencia General - Temperatura fría	37
Gráfica 22.Curva de potencia General - Temperatura media.....	37
Gráfica 23. Curva de potencia General - Temperatura alta.....	38
Gráfica 24. Diferencia bin a bin entre la comparativa general y cada sector de temperaturas (anemómetro de cazoletas) Parque estudio	38
Gráfica 25.Rosa de vientos de las veletas del emplazamientos (frecuencia %).....	43
Gráfica 26. Sectorización de datos por temperatura	44
Gráfica 27. Clasificación de datos en 3 temperaturas.....	45
Gráfica 28. Correlación lineal entre el anemómetro sónico y el de cazoletas	45
Gráfica 29. Relación bin a bin sector temperatura fría (emplazamiento Walqa)	46
Gráfica 30. Relación bin a bin sector temperatura media (emplazamiento Walqa)	46
Gráfica 31. Relación bin a bin sector temperatura alta (emplazamiento Walqa).....	47
Gráfica 32. Diferencia bin a bin entre la comparativa general y cada sector de temperaturas (anemómetro de cazoletas) Parque Walqa.....	49
Gráfica 33. Comparativa método de los bines y regresión lineal	54

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Importancia en un proyecto eólico

La instalación de un parque eólico conlleva largos y costosos estudios que se prolongan a lo largo de varios años. La variable más importante para la caracterización de un parque eólico es la velocidad de viento. Desviaciones en un pequeño tanto por ciento en la velocidad de viento repercuten en grandes errores en la diferencia entre el recurso estimado y el real. Por ello, tiene una gran importancia la medida de velocidad a lo largo de todo el proyecto eólico; siendo necesarios grandes esfuerzos para maximizar la longitud, calidad y cobertura de los datos. [3]

Antes de la construcción

En primer lugar, se realiza el estudio de recurso por medio de campañas de viento para la estimación de la futura producción del parque eólico por medio de torres meteorológicas.

Éstas se sitúan en un punto representativo del terreno y registran datos del viento para caracterizarlo. Se almacenan esos datos con un sistema de adquisición para una posterior descarga. Los datos deben ser representativos a largo plazo, con una disponibilidad de alrededor a los 10 años. En muchos casos se trata de una labor no viable por tiempo y economía. Se recurre a estimar las velocidades gracias a torres cercanas o servicios meteorológicos para conocer la rentabilidad del futuro parque eólico. Según emplazamiento se instalan varias torres, cada torre con varios sensores, sobre todo sensores de velocidad. [7]

Por otro lado, otros estudios que se realizan previamente a la construcción son el estudio de clase de emplazamiento y el estudio de curva de potencia.

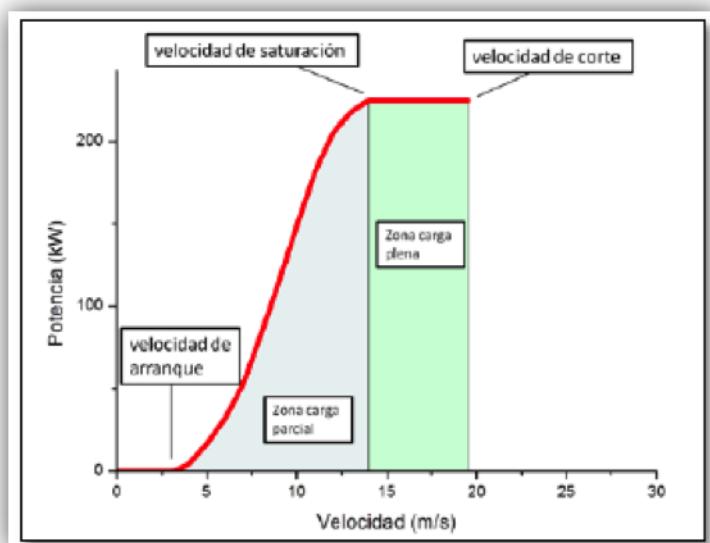
El estudio de clase de emplazamiento se basa en la norma UNE-EN 61400-1:2006 y tiene como objetivo optimizar la disposición de los aerogeneradores sobre el terreno y alcanzar los cumplimientos de diseño de la máquina.

El estudio de curva de potencia basado en las normas IEC 61400-12-1 y -2 tiene como principal objetivo garantizar la producción del parque eólico. Se trata de relacionar la velocidad de viento de la torre meteorológica de referencia del parque con las velocidades que se alcanzan a la altura de buje de uno o varios aerogeneradores del parque. De esa manera, se garantiza la curva de potencia que tendrá el aerogenerador o parque para cada régimen de velocidad de viento. [12]

En la operación del parque

Una vez instalados los aerogeneradores, se debe asegurar su correcto funcionamiento y óptima explotación energética.

El conocimiento de la velocidad de viento es esencial para gestionar el control del aerogenerador según su tecnología. Se pueden diferenciar hasta tres velocidades características en la curva de potencia de un aerogenerador, tales como muestra la gráfica 1:



Gráfica 1. Curva de potencia de un aerogenerador

- Velocidad de arranque, velocidad a partir de la cual el aerogenerador está en disposición de generar energía.
- Velocidad de corte, velocidad de seguridad en la que los dispositivos de frenado y orientación realizan el parado de la máquina.
- Velocidad de saturación o nominal, en los aerogeneradores con capacidad de cambio de ángulo de ataque de las palas. A partir de esta velocidad, el aerogenerador ha alcanzado la potencia nominal del generador y controlando el ángulo de ataque de la pala (pitch) se logra una potencia constante hasta la velocidad de corte.

Para llevar un seguimiento de la operación de un parque eólico se realizan estudios periódicos mediante el análisis adecuado de los datos de la potencia producida y de la velocidad de viento registrada en los anemómetros colocados en las góndolas. También se realizan auditorías energéticas en las que se calcula la disponibilidad, el rendimiento, las pérdidas energéticas producidas por las paradas de las máquinas como también otros parámetros que ayudan a la correcta operación del parque.

Otras acciones que se basan en el conocimiento de la velocidad de viento son las estimaciones de producción del parque (gestión de la energía) y la planificación de los mantenimientos preventivos que se realizan en el parque (gestión de mantenimiento para una mínima afección en la disponibilidad y rendimiento energético del parque por la parada de máquinas).

Todas las acciones anteriores implican el tratamiento de una gran cantidad de datos que permitan caracterizar el parque antes de la instalación, controlar el correcto funcionamiento

una vez construido y estimar las futuras producciones. La medida de velocidad de viento debe ser muy precisa y lograr una independencia de otras propiedades físicas y climatológicas. De esa manera, no se producirá una superposición y expansión de errores en los sucesivos análisis.

En referencia a estudios anteriores, se parte de los resultados obtenidos sobre proyectos que estudien la influencia de la temperatura en la operación de los anemómetros [4]. En él, se estudió el fenómeno de la fricción mecánica que se produce en los anemómetros de cazoletas, cuando estos son sometidos a temperaturas frías. Los resultados ofrecidos en este proyecto permiten observar la influencia de la temperatura, sobre todo a bajas velocidades de viento reduciéndose conforme aumenta la velocidad. Las temperaturas bajas provocan diferencias negativas respecto al comportamiento general del periodo es decir, que la medida obtenida es menor a lo esperable. Para temperaturas altas se presenta el fenómeno contrario. [4]

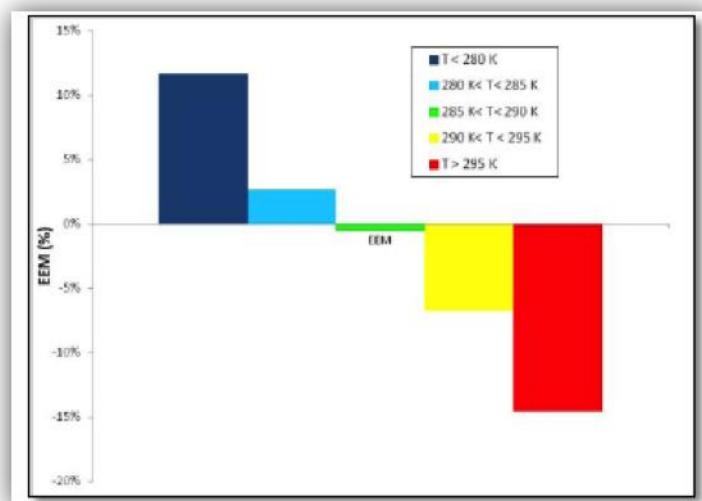


Ilustración 1. EEM para cada sector de temperaturas

Además, También se recogió la influencia de la temperatura sobre la intensidad de turbulencia registrada.

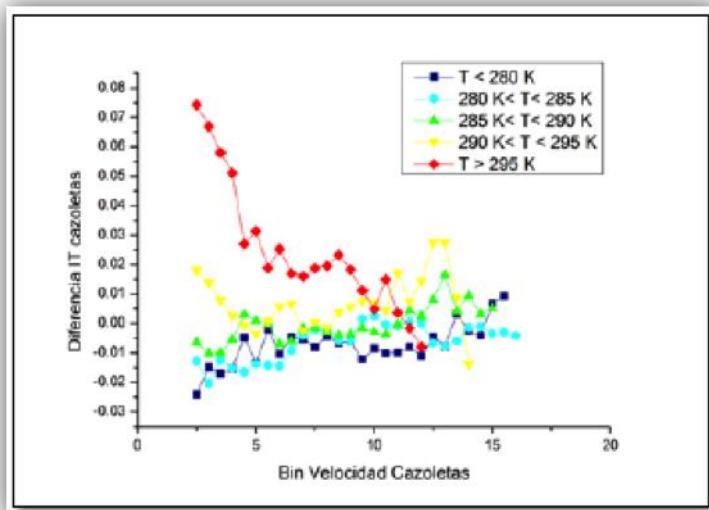


Ilustración 2. Diferencia de IT para cada sector de temperaturas en el anemómetro de cazoletas

Por ello, se constató la existencia de la influencia de la temperatura en la señal de salida de los anemómetros de cazoletas. Esta influencia debería ser tenida en cuenta durante los ensayos de calibración de los anemómetros, en los estudios de evaluación de potencial eólico así como en la evaluación de la producción de aerogeneradores para la optimización de la operación del parque eólico. Para poder valorar esta influencia adecuadamente harían falta investigaciones adicionales centradas en el desarrollo de modelos y metodologías de caracterización de esta influencia.

Adicionalmente, se añadió como revisión bibliográfica un estudio sobre la influencia de la densidad en la calibración de los anemómetros de cazoletas. El estudio revela las desviaciones producidas en dichos sensores cuando son sometidos a variaciones de densidad.

Como consecuencia de estas conclusiones, tiene origen este estudio. Se partirá desde la perspectiva final del anterior estudio, pero esta vez se analizarán dos emplazamientos con condiciones climáticas diferentes y se añadirá un nuevo parámetro de estudio, la densidad del aire.

1.1. Alcance y objetivos

El objetivo de este estudio es la determinación de la influencia de la temperatura sobre los registros de viento reproducidos por el anemómetro de cazoletas del emplazamiento eólico sometido a estudio. Para ello, se han utilizado registros de viento recogidos durante el año 2010. Debido a la privacidad de los mismos, cualquier información técnica referente al emplazamiento ha quedado sin registrar.

Los datos registrados son tratados en hojas Excel, los cuales han sido clasificados con la mayor precisión posible en aras de una mayor clarificación en los resultados.

Para el desarrollo de este proyecto se han realizado las siguientes fases:

- Revisión bibliográfica sobre estudios de influencia de la temperatura en sensores
- Documentación sobre metodología de trabajo, así como sus procesos
- Formación para la implementación del método aplicado
- Análisis e interpretación de resultados
- Escritura de la memoria del proyecto

2. MEMORIA

El presente trabajo parte de estudios ya realizados sobre la influencia de las condiciones climáticas en los anemómetros de cazoletas. Como hipótesis principal, se parte de una única variable de fundamento, la temperatura. Dicho parámetro, relaciona directamente otras variables que entran en juego, como la densidad, la humedad y en consecuencia la velocidad del viento.

La memoria se compone de tres partes principales: La variable de velocidad de viento, la metodología aplicada en el trabajo y los resultados obtenidos. Como apoyo a dichas parte, el estudio cuenta con unos anexos que refuerzan las conclusiones obtenidas.

En el primer capítulo se estudia la velocidad del viento, es la variable principal de cualquier proyecto eólico. En esta parte, se detalla el funcionamiento de los sensores objeto de estudio, así como la importancia de su calibración.

La metodología seguida en el trabajo es crucial para obtener un rango de datos sin incidencias ni perturbaciones. De este modo, se asegura una garantía en los resultados obtenidos durante el proceso.

El análisis de los resultados, completa el estudio. En esta parte, se comparan los anemómetros estudiados con el fin de conocer el comportamiento y su respuesta cuando son agrupados por rangos de temperatura. De la misma manera, también se estudia la estimación de producción y la curva de potencia. Tras la consecución de los mismos, queda patente la influencia resultante en las variaciones de temperatura y densidad del emplazamiento.

En los anexos encontramos la información más detallada de los estudios realizados, en los cuales figura un estudio paralelo de otro emplazamiento distinto al presentado a lo largo de esta memoria.

2.1. La velocidad del viento

2.1.1. El anemómetro

El anemómetro es el instrumento que mide la velocidad de viento. Es el principal dispositivo para estudiar el recurso eólico de un emplazamiento. Los anemómetros son instalados en torres meteorológicas a alturas similares a la del buje del aerogenerador. El desarrollo

tecnológico ha provocado un aumento de las alturas de buje para lograr producciones mayores al encontrar perfiles de viento mayores y más estables. Este avance ha estimulado una mejora paralela en las distintas tecnologías de medición de viento sin la instalación de torres meteorológicas que pueden dejar de ser viables a tales alturas. [4]

Rotación

Pueden ser de cazoletas o de hélice.

El anemómetro de cazoletas consiste en tres o cuatro cazoletas montadas simétricamente alrededor de un eje vertical. Debido a que la fuerza que ejerce el aire en el lado cóncavo es mayor que en el lado convexo, la rueda de cazoletas gira. La velocidad de rotación es proporcional a la velocidad del viento. Dicha rotación puede medirse de varios modos: contando mecánicamente el número de revoluciones, conectando el eje de la rueda de cazoletas a un pequeño generador eléctrico y midiendo el voltaje instantáneo, o a un interruptor optoelectrónico y midiendo su salida. [9]

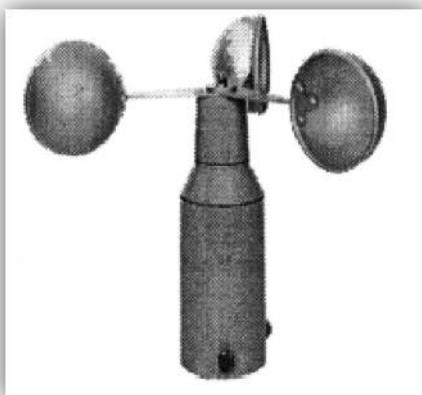


Ilustración 3. Anemómetro de cazoletas



Ilustración 4. Anemómetro de hélice

El anemómetro de cazoletas es el tipo más extendido, más simple, robusto y barato. En su utilización, aparecen principalmente tres posibles fuentes de error:

- El par de fricción de los rodamientos, genera la existencia de una velocidad umbral a partir de la cual el anemómetro comienza a girar. Este efecto repercuten en una mayor incertidumbre a velocidades bajas. El estado estático del dispositivo puede arrojar errores del 1 al 5% de las medidas.
- Los Efectos dinámicos hacen al anemómetro acelerar con más rapidez de lo que decelera, a este efecto se le denomina sobrevelocidad (overspeed). Depende del tipo de anemómetro y se expresa por su constante de distancia. Este efecto tiene un rol bajo, errores del 0.2% a 1% [7]

- Respuesta angular, el flujo de aire no es totalmente horizontal, hay una cierta componente vertical que afecta a las medidas de velocidad horizontal que son las que nos interesa medir al estar directamente relacionadas con la producción de energía. Depende de la forma de las cazoletas (semiesféricas o cónicas). Este error puede llegar a errores del 0.2% al 2%. [7]

Anemómetro sónico

Este anemómetro, no se basa en un principio mecánico sino en la medida del tiempo que tarda una señal de sonido en atravesar una distancia conocida entre pares de transmisores y receptores. Según la velocidad de viento, este tiempo varía ya que afecta a la propagación de las señales de sonido. Las señales pueden ser continuas o del pulso, realizándose las medidas entre direcciones perpendiculares pudiendo utilizar dos o tres ejes (plano horizontal o vector completo de velocidad de viento, respectivamente).

Es considerablemente más caro y con un consumo energético mayor que el anemómetro de cazoletas, aunque tiene mayor precisión y no requiere de mantenimiento mecánico al no contener piezas móviles. En cambio, suelen tener problemas para medir cuando las condiciones meteorológicas son adversas, perdiéndose muchos registros. Estos anemómetros no suelen ser comunes en las campañas de medida.[9]



Ilustración 5. Anemómetro sónico

Otros: LIDAR, SODAR

Son sistemas que tienen como peculiaridad el permitir medir la velocidad del viento a diferentes alturas, requisito cada vez más necesario para conocer la velocidad en la altura de buje de los nuevos aerogeneradores (las torres meteorológicas pueden ser no viables a partir de cierta altura dependiendo del terreno) y conocer las velocidades a las que se expondrán las puntas de pala en su posición superior como inferior. El LIDAR se basa en la dispersión de ondas sonoras y el SODAR en el retraso temporal de un haz de láser reflejado por los aerosoles presentes en el aire.

2.1.2. Calibración

La correcta calibración de los anemómetros, como del resto de sensores usados en un proyecto eólico, es básica para garantizar unos resultados con un nivel mínimo de precisión. MEASNET (International Measuring Network of Wind Energy Institutes) propone un procedimiento para la calibración de anemómetros de cazoletas basado en la norma 61400-12-1:2005(E), este procedimiento es el más aceptado internacionalmente. Por medio de un túnel de viento, las instituciones autorizadas testean los anemómetros certificando los resultados obtenidos. [7]

La calibración permite una minimización de los errores cometidos en la medida debidos a parámetros externos o internos de cada tipo de anemómetro; sin embargo, como las condiciones en las que se realiza la certificación en el túnel de viento no recogen todas las condiciones que sufren los anemómetros en operación, surgen comportamientos anómalos que todavía necesitan ser estudiados con detenimiento.

Calidad de las medidas y rangos de operación

Es recomendable que el error relativo en la medición de velocidad de viento, sea menor del 3% para velocidades de 10 m/s.

La Tabla muestra los rangos de operación, según algunas condiciones ambientales y del terreno, en los cuales es conveniente que el anemómetro mida con la exactitud certificada. Los valores límites reflejan los rangos de operación del aerogenerador y condiciones climáticas extremas. [6]

Tabla 1. Rango de valores de aerogenerador

Parámetro	UNIDADES	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Velocidad del viento (promedios de 10 minutos)	m/s	3	18
Intensidad de turbulencia	%	5	$(48/u) + 12$ u es la velocidad del viento
Temperatura ambiente	°C	-10	40
Densidad del aire	Kg/m ³	0,80	1,35
Pendiente del terreno donde está emplazada la torre anemométrica	°	-10	10

2.2. Influencia en la medida de parámetros en campo

La medida registrada por los anemómetros es sensible en su operación a las condiciones meteorológicas, topografía, problemas con la adquisición de datos o la degradación del instrumento. Estas condiciones no son recogidas en los test de calibración. Dada la importancia de la correcta medición de la velocidad del viento, se han realizado diferentes estudios para verificar las experiencias en campo. [13]

Una serie de anemómetros de cazoletas calibrados en operación pueden tener desviaciones de la recta de calibración aumentando la incertidumbre en la medida, lo que puede variar drásticamente la rentabilidad de un proyecto eólico al registrar menores velocidades a las reales del emplazamiento.[5]

Una de las variables que más afecta a la medida y de la que no se tiene una lectura representativa en los ensayos de túnel de viento es la intensidad de turbulencia vertical. Ésta depende del flujo específico del lugar y del régimen de turbulencia. La orografía, la naturaleza del viento, los obstáculos cercanos al lugar de medida, la altura de medición pueden afectar incrementando la desviación de las medidas, resultando una perturbación mayor a la que realmente tiene el emplazamiento.

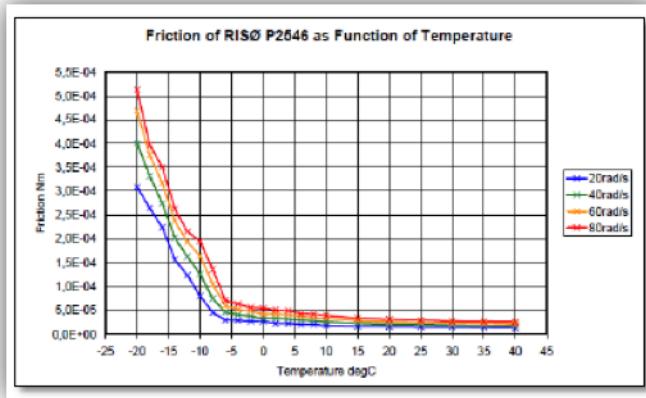
Otros aspectos críticos son los relacionados con las condiciones climatológicas. Fenómenos esporádicos como la caída de rayos pueden tener un efecto destructivo en los sensores si éstos no son protegidos correctamente. Otros más frecuentes como la acumulación de escarcha o nieve en las cazoletas causan un cambio en el comportamiento aerodinámico, se hace necesaria la detección y eliminación de los datos afectados así como la prevención a través de calentadores. Otras condiciones frecuentes como son la lluvia o la niebla son más críticos en los anemómetros sónicos ya que distorsionan la señal emitida para conocer el vector de velocidad en cada instante.

Otras variables climatológicas como la temperatura (fricción mecánica) y la densidad del aire también producen desviaciones en la recta. Por ello, en este estudio se analizará detalladamente la problemática originada por dichas variables.

Fricción mecánica (temperatura)

La temperatura es una de las principales variables del estudio. La medición in situ de la temperatura del aire en general se recomienda especialmente para los lugares donde los rangos de temperatura son extremos. La medición debe llevarse a cabo de acuerdo con la norma IEC 61400-12-1.

En los anemómetros de cazoletas, uno de problemas más perniciosos es el efecto de la temperatura. El efecto de las temperaturas frías, repercute negativamente sobre la fricción mecánica. Las ecuaciones, utilizadas en la calibración, modelan este efecto introduciendo un offset necesario para sobrepasar la fricción estática y la no linealidad. Los coeficientes de fricción son dependientes de la temperatura y se estiman para diferentes temperaturas en los test (gráfica 2). [14]



Gráfica 2. Fricción de un anemómetro de cazoletas en función de la temperatura y la velocidad de rotación

Sin embargo, aunque un anemómetro de cazoletas opere correctamente en el túnel de viento en condiciones normales puede no tener la misma característica de calibración en servicio bajo atmósferas en las que la temperatura y densidad cambien constantemente. Según el estudio [14], se experimentó este comportamiento en un túnel del viento con 170 anemómetros de cazoletas. En los resultados arrojados se observa una clara dependencia lineal en los parámetros de calibración con la densidad afectando al arranque de los anemómetros; aunque esta variación es menor al 1% permitido por el procedimiento MEASNET. Esta dependencia combina el efecto de la temperatura ambiente y la presión. Como se citó anteriormente, la temperatura puede tener una influencia en el comportamiento del torque de fricción existente en los rodamientos del anemómetro al aumentar o disminuir la viscosidad de los aceites. Es decir, en un incremento de temperatura cabe esperar una menor fricción y por tanto el umbral de fricción decrezca para producir la rotación de las cazoletas. En cambio, si el efecto de la temperatura en la densidad es considerado, el resultado parece contradecir el argumento del efecto sobre la fricción (mayor densidad implica menor temperatura y resulta mayor torque de fricción y mayor valor de offset, ya que se necesita una presión dinámica alta para iniciar la rotación de la cazoleta). Sin embargo, se debe considerar que la temperatura a través de la densidad, tiene un efecto aerodinámico importante, al depender linealmente las fuerzas aerodinámicas con la densidad en un primer orden. [10]

En la práctica, en los estudios de viabilidad se aconseja no tener en cuenta los datos por debajo de una referencia que puedan arrojar medidas con una gran incertidumbre, generalmente se fija en 2°C. Este hecho reduciría considerablemente la disponibilidad en climas templados sobre todo; ya que en fríos se suelen incluir calentadores en los anemómetros. La eliminación de esta información tendría un efecto negativo en etapas en la que la medida de la velocidad del viento es más crucial, como en el control del aerogenerador o etapas muy ajustadas en tiempo como el estudio de curva de potencia.

Por lo que es necesario un estudio más detallado de la operación de los anemómetros. Cuya iniciativa principal sea el reflejar el efecto de la temperatura en las medidas de velocidad de viento, para que sea tenido en cuenta en los estudios eólicos.

Densidad del aire

Es un parámetro función de la temperatura ambiente y de la presión atmosférica, representada a través de la ecuación:

$$\rho_i = \frac{B_i}{R \cdot T_i} \quad (\text{ec.3})$$

Donde ρ es la densidad de aire promediada cada diez minutos en kg/m³, B es la presión atmosférica en Pa, T_i es la temperatura absoluta del aire en K y R es una constante de gas para aire seco con un valor de 287.05 J/kg K en el Sistema Internacional para el diezminutal i.

El cálculo de la densidad del aire se realiza de acuerdo a IEC 61400-12-1 [[1][2]]. La corrección para el efecto de la densidad de la humedad del aire se puede realizar de acuerdo con la norma IEC 61400-12-1 [1].

La densidad es un parámetro de estudio al que solamente se le ha dado prioridad para la producción de energía en los aerogeneradores. En los últimos años, los estudios han confirmado que dicho parámetro tiene una influencia significativa en las lecturas de los anemómetros. Como resultado de ello, se analizan las conclusiones arrojadas por dichos estudios.

Para entender correctamente el funcionamiento y calibración de los anemómetros, se debe incidir en los parámetros que afectan en su calibración.

Tras realizar múltiples ensayos en un túnel del viento la exactitud del anemómetro se convierte en una certeza y es posible realizar un estudio más exhaustivo. Como resultado de este proceso de calibración es posible obtener los coeficientes A y B de la función de transferencia del anemómetro:

$$V = A \cdot f + B \quad (\text{ec. 1})$$

Donde V es la velocidad del flujo (velocidad del viento), f es la frecuencia de salida de la rotación del anemómetro, A (pendiente) y B (Offset). Esta relación lineal entre la velocidad del viento medida y la frecuencia de salida del anemómetro es lo suficientemente exacta para la mayoría de propósitos [11]

Las condiciones ambientales tienen un efecto sobre el comportamiento de los anemómetros, ya que su respuesta (cambios en la velocidad de rotación, ω) depende de los pares aerodinámicos y de la fricción (QA y Qf respectivamente), es decir:

$$I \frac{d\omega}{dt} = QA + Qf \quad (\text{ec. 2})$$

Donde I es el momento de inercia. El par aerodinámico (QA), es una función de la densidad del aire (ρ), entre otros parámetros, y el momento de rozamiento, (Qf), es una función de la temperatura ambiente, T, y la velocidad de rotación, ω [6].

En un estudio de calibración ordinario, se tiene en cuenta un cierto margen de error producido por estas variables. Las desviaciones originadas por la densidad en entornos donde la amplitud térmica es considerable no se tienen en cuenta. Esto origina una fluctuación importante en las lecturas de velocidad del anemómetro.

Prueba de ello son los resultados obtenidos en el estudio “*Deviation of cup and propeller anemometer calibration. Results with air density*”.

En esta tabla se refleja el porcentaje de variación que sufren los diferentes rangos de velocidad, cuando son sometidos a un intervalo de variación de la densidad de 0,1 Kg/m³. Una de las particularidades que se ha de tener en cuenta en estos estudios, es que cada anemómetro tiene una respuesta diferente. Una de las particularidades halladas tras estas variaciones, es la desviación positiva que tiene la pendiente de la recta. [11]. Esto origina una medición de la velocidad de viento más rápida, para densidades más elevadas.

Tabla 2. Porcentaje del intervalo de variación, de la velocidad del viento medida debido a una variación de la densidad de $\Delta p = 0,1 \text{ Kg/m}^3$, para los modelos de anemómetro analizados.

Anemometer	$V = 4 \text{ m s}^{-1}$		$V = 7 \text{ m s}^{-1}$		$V = 10 \text{ m s}^{-1}$	
	lower limit	upper limit	lower limit	upper limit	lower limit	upper limit
NRG Systems Maximum 40/40C	-2.71%	3.58%	-1.83%	2.35%	-1.47%	1.86%
Secondwind C3	-2.79%	1.77%	-2.03%	1.11%	-1.73%	0.84%
TH 4.3350	-1.48%	2.48%	-1.34%	1.48%	-1.29%	1.08%
TH 4.3351	0.01%	1.72%	-0.13%	1.00%	-0.19%	0.72%
TH 4.3303	-9.21%	1.57%	-5.36%	1.79%	-3.83%	1.88%
A100 L2	-1.50%	1.89%	-0.57%	1.84%	-0.19%	1.82%
A100 LK	-1.71%	2.16%	-1.18%	1.58%	-0.97%	1.34%
Ornytion 107A	-1.09%	1.27%	-0.91%	0.77%	-0.83%	0.58%
RM Young 3002/3102	-21.14%	6.24%	-12.33%	4.41%	-8.80%	3.68%
RM Young 05103	-1.42%	3.31%	-0.93%	2.24%	-0.74%	1.81%
A100 L2 (IDR/UPM)	-3.48%	0.56%	-2.05%	0.75%	-1.47%	0.82%
TH 4.3350 (IDR/UPM)	0.02%	2.35%	-0.40%	1.26%	-0.57%	0.82%

En la siguiente tabla se detalla en porcentaje las fluctuaciones de la **energía anual producida (AEP)** debido a las oscilaciones en la densidad. En este caso, se ponen de ejemplo varios anemómetros y diferencias de densidad de 0,05 Kg/m³ y 0,1 Kg/m³.

Tabla 3. . Desviación de la AEP debido a las variaciones en las mediciones de velocidad del viento causadas por la fluctuación de la densidad del aire, $\Delta\rho = 0,05 \text{ Kg/m}^3$, y $\Delta\rho = 0,1 \text{ Kg/m}^3$, en función de la velocidad media anual del viento (4 m/s, 7 m/s)

NRG Systems Maximum 40/40C				
Annual average wind speed	$\Delta\rho = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$		$\Delta\rho = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit
4 m·s ⁻¹	-10.08%	13.19%	-20.15%	26.37%
7 m·s ⁻¹	-5.17%	5.76%	-10.34%	11.53%
10 m·s ⁻¹	-2.93%	3.09%	-5.86%	6.17%
Secondwind C3				
Annual average wind speed	$\Delta\rho = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$		$\Delta\rho = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit
4 m·s ⁻¹	-8.83%	8.89%	-17.66%	17.78%
7 m·s ⁻¹	-4.63%	3.94%	-9.27%	7.88%
10 m·s ⁻¹	-2.64%	2.12%	-5.28%	4.23%
Thies Clima 4.3350				
Annual average wind speed	$\Delta\rho = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$		$\Delta\rho = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit
4 m·s ⁻¹	-7.30%	9.28%	-14.60%	18.56%
7 m·s ⁻¹	-3.98%	4.10%	-7.96%	8.19%

Tras el análisis de las tablas, se observa que los resultados indican que este efecto puede ser alto si se traduce en la producción de energía anual.

Velocidad del viento

Es la principal variable a medir. Se dispondrá como mínimo de dos anemómetros de cazoletas y uno sónico (3D).

En el anemómetro de cazoletas se utilizará la lectura original del registrador. En cambio, en el anemómetro sónico, la lectura diezminutal se trata de un vector de velocidad en las tres dimensiones.

Una variable derivada de la velocidad es la intensidad de turbulencia. Las variaciones turbulentas a corto plazo en la velocidad de viento son importantes para el diseño y evaluación de las turbinas eólicas. Es mayor durante el día y en días con altas temperaturas, también aumenta en terrenos complejos debido a que la superficie perturba más las corrientes de aire. [4]

$$IT'i = \frac{\sigma_i}{V_i} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde IT es la intensidad de turbulencia, σ la desviación típica y V la velocidad media en el diezminutal i.

La medición in situ de la velocidad del viento se lleva a cabo según la norma IEC 61400-12-1. Los anemómetros deben ser calibrados de acuerdo a la directriz MEASNET [5] y recibir su aprobación, preferiblemente durante una única campaña de calibración. [12]

La velocidad del viento se mide con promedios de 10 minutos, preferiblemente con una velocidad de muestreo de 1 Hz o más rápido. El sistema de documentación de datos deberá registrar y guardar los promedios y las desviaciones estándar, así como también los mínimos y máximos de los mismos.

El período de medición deberá cubrir al menos 12 meses completos y consecutivos, para poder evaluar las variaciones estacionales. Si los datos de más de una torre meteorológica están disponibles, la correlación entre las mismas se debe realizar para prorrogar el período de medición para cada una de ellas y para llenar los datos vacíos.

La medición se considera incompleta, si una o más de las siguientes condiciones se cumplen:

- El período de medición de las torres meteorológicas “in situ” no cubre al menos 12 meses consecutivos.
- La disponibilidad de los datos brutos filtrados, ya sea del sensor correspondiente o una veleta que se instala a 30 m, es menor del 90%.
- La disponibilidad de los datos rellenados por métodos MCP es inferior al 95%.

Si la medición se considera incompleta, esto debe indicarse claramente como la desviación de la norma, en la presentación de los resultados y hay que tener en cuenta para la evaluación de la incertidumbre.

La re-calibración de los anemómetros se debe realizar después de 12 meses y tras el final del período de medición a través de la calibración del túnel de viento por una institución acreditada MEASNET. Si la re-calibración, muestra resultados que se desvían de manera significativa, se realizaran evaluaciones comparativas con el objetivo de determinar el momento en que las desviaciones comenzaron a ser significativas.

En caso de que las diferencias de calibración parezcan ser demasiado altas, se informará del análisis de las diferencias de calibración y se rechazarán los datos debido a diferencias de calibración. Alternativamente, los datos sospechosos pueden ser retenidos. [7]

Dirección del viento

Gracias a sus lecturas se conocerá las rosas de frecuencia y energía del emplazamiento, muy importante en un estudio de recurso. En el estudio permitirá conocer los sectores de dirección menos importantes los cuales podrán ser obviados al no ser representativos.

La medición in situ de la dirección del viento se llevará a cabo de acuerdo a IEC 61400-12-1 [7]. El montaje de la veleta (s) se realizara de acuerdo a la norma IEC 61400-12-1 [4]. El objetivo es reducir al mínimo los efectos de distorsión de flujo con respecto al sector de 360º.

Los datos de dirección del viento se recogen también en promedios de 10 min, preferiblemente con una velocidad de muestreo de 1 Hz o más rápido. El sistema de recogida de datos deberá registrar y guardar los promedios y las desviaciones estándar.

Flujo de inclinación

La componente vertical del flujo, está fuertemente ligada a la pendiente del terreno circundante. Por lo tanto, para los sitios de complejos, se deben utilizar sensores apropiados para medir los tres componentes del flujo, a fin de obtener la mayor precisión posible.

Presión

El estudio cuenta con los datos registrados por el barómetro. Complementará a la temperatura en el cálculo de la densidad de aire.

Es recomendable medir la presión del aire “in situ” y preferentemente cerca de la altura del buje. Si el sensor de presión de aire no está montado cerca de la altura de buje, las mediciones de la presión de aire se corregirán a la altura de acuerdo con la norma ISO 2533. [7]

Humedad

Es una variable influyente en la determinación de la presión del emplazamiento. En el estudio no se han requerido los datos registrados sobre este parámetro.

Se recomienda la medición in situ de la humedad relativa en sitios con altas temperaturas y sitios con condiciones climáticas extraordinarias. El sensor de humedad debe estar montado dentro de la parte superior a 10 m del mástil de medición. [7]

Potencia

A través de los datos registrados de la velocidad de viento en el anemómetro de la góndola del aerogenerador, y la potencia eléctrica activa del mismo, se genera la curva de producción. De este modo, se conoce la potencia eléctrica generada para una velocidad de viento dada.

Los conjuntos de datos de velocidad y potencia, deben ser normalizados a dos densidades del aire:

- Densidad del aire a nivel del mar, r_0 , atmósfera estándar ($r_0=1,225 \text{ kg/m}^3$).
- Densidad el aire promedio de los datos medidos, redondeados al valor más próximo de la cifra significativa de $0,005 \text{ kg/m}^3$.

Velocidad del viento: para aerogeneradores con control de potencia activo, la normalización se aplicará a la velocidad del viento, con la expresión:

$$V_n = V_{10 \text{ MIN}} (\rho_{10 \text{ MIN}} / \rho_0)^{1/3} \quad (\text{ec.4})$$

Donde:

V_n : velocidad del viento, normalizada, [m/s].

$V_{10 \text{ MIN}}$: velocidad del viento medida, promediada en 10 minutos, [m/s].

3. METODOLOGÍA

Para una estimación más precisa del funcionamiento de los anemómetros estudiados se necesita el mayor número de registros validos posibles así como localizar con la mayor precisión las incidencias y perturbaciones producidas durante el periodo de estudio.

Para ello se debe definir un procedimiento, que garantice una alta fiabilidad en la precisión de los registros clasificados.

3.1. Registro de datos

Las variables que se van a tener en cuenta en el estudio se recogen principalmente en el registrador de la torre meteorológica y que posteriormente se ajustarán para su análisis en hojas Excel. Todas las señales generadas en los sensores se envían al registrador que es un dispositivo electrónico con una memoria capaz de registrarlas. Su funcionamiento es el adquirir y procesar las señales que miden las variables necesarias para el estudio, realizar un almacenamiento de la información y servirla en una transferencia de datos. Los valores que se calculan habitualmente en cada periodo programado son el valor medio, la desviación estándar y los valores máximo y mínimo.

Los datos en este estudio se basan en periodos diezminutales durante un año de duración, en los intervalos comprendidos entre febrero-junio de 2010 y noviembre-diciembre de 2010.

Según está establecido en los sistemas eólicos, se tiene como unidad de tratamiento de datos los diez minutos debido a que la energía cinética del viento en el dominio de la frecuencia no muestra una gran potencia para esa medida temporal, éste apenas sufre alteraciones con la posición geográfica.

Definición de conceptos

Registros disponibles: son los registros pares de viento-potencia registrados durante el periodo de estudio.

Registros útiles: son los registros cuya velocidad y potencia se consideran registros válidos y aquellos registros que pueden ser recuperados mediante técnicas de correlación.

Producción útil: es la suma de las potencias de todos los registros útiles.

El hecho de que la máquina no esté produciendo energía no implica que esté indisponible; puede no estar produciendo energía porque no se den las condiciones exteriores adecuadas para ello. Un ejemplo puede ser que la velocidad del viento este fuera del rango de funcionamiento o errores en la red de evacuación. [8]

Datos de velocidad y potencia

- Funcionamiento normal: son comportamientos propios del aerogenerador.
- Registros erróneos: son valores mal registrados que no deben entrar en los cálculos del estudio.
- Errores: son las incidencias que producen pérdidas de producción y/o de disponibilidad.

Funcionamiento normal

Son comportamientos normales del aerogenerador todos aquellos eventos cuya relación velocidad potencia es próxima a la indicada por el fabricante; pero también existen circunstancias especiales que se engloban como funcionamiento normal, estas son:

- Calma: cuando se dan velocidades muy bajas en todos los aerogeneradores, aparecen registros clavados de muy bajo valor con valores de producción nulos o incluso negativos debidos al consumo.
- Cambios de rendimientos estacionales: la densidad del aire afecta el rendimiento de la máquina y se observan mayores rendimientos en invierno que en verano.

Registros erróneos

Los registros erróneos son valores mal registrados por causa de un fallo en el sensor de medición o del sistema de adquisición de datos.

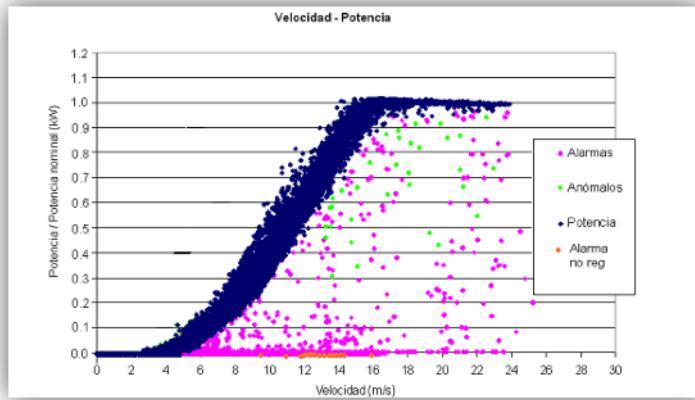
Los errores en el registro se identifican en el archivo de datos de velocidad-potencia por:

- Valores fuera de rango: se registran valores de velocidad o de potencia que no se corresponden con las condiciones normales de funcionamiento, como velocidades negativas o muy altas y potencias muy superiores a la nominal del aerogenerador.
- Anomalías en sensores: el valor registrado, aun estando dentro del rango de valores, difiere mucho con el resto de valores registrados. Por ejemplo, cambios bruscos en la velocidad registrada, velocidades muy inferiores a las registradas en los aerogeneradores cercanos, potencias muy superiores a la correspondiente por el valor de velocidad de góndola registrado, etc.

Errores

En este grupo se describen las incidencias que provocan que el aerogenerador no produzca en condiciones normales:

- Alarmas registradas



Gráfica 3. Ejemplo de una clasificación de datos de un aerogenerador

- Alarms no registradas: son periodos en los que el aerogenerador no produce y la velocidad de góndola es superior a la de arranque, no habiéndose registrado ninguna alarma en ese periodo.
- Anómalos: son periodos en los que el aerogenerador produce pero no todo lo que debería sin haberse registrado ninguna otra incidencia en ese periodo.
- Heladas: Son periodos anómalos coincidiendo con temperaturas inferiores a 0º Centígrados. Los periodos con helada también provocan clavadas y errores en los sensores de velocidad por lo normalmente la potencia está bien registrada y es el valor correcto y hay un error en la velocidad medida.

Una vez definidos los periodos con incidencias se procede a los cálculos de los parámetros necesarios para obtener un comportamiento del aerogenerador. En este apartado se va a definir el tratamiento de los distintos archivos y los cálculos necesarios para el seguimiento.

Los archivos a tratar son el de datos de velocidad y potencia, buscando y marcando las incidencias producidas, y alarmas.[8]

3.2. Tratamiento de datos

Los datos descargados tanto en la torre como en el aerogenerador son almacenados en archivos de datos sin formato con extensiones .dat o .csv.

Estos archivos se extraen en una hoja de cálculo. El siguiente objetivo consiste en localizar los registros de viento-potencia que alteren la normalidad del funcionamiento de los sensores, para que puedan ser aislados y no produzcan desviaciones en su posterior estudio. El procesado que se ha seguido para alcanzar el objetivo se basa en el esquema de la Gráfica 4.



Gráfica 4. Proceso del tratamiento de datos

Inicialmente, los datos de ambas fuentes son extraídos en hojas de cálculo y se realiza una comprobación en la sincronización de los datos. El registrador de la torre meteorológica unifica temporalmente las señales provenientes de los sensores instalados. Por otra parte se encuentra la referencia temporal del aerogenerador y su potencia eléctrica [8].

Las referencias temporales están sincronizadas y con registros temporales correctos, pero se observa una ausencia de registros ya que no existen los totales comprendidos por un año. La razón más común se debe a un fallo en la red de alimentación de los sensores y/o registrador, si la tensión que alimenta es inferior a la necesitada, el registrador no puede grabar los datos y se produce un hueco de información.

Una vez que los datos están sincronizados, se procede a un filtrado de los mismos.

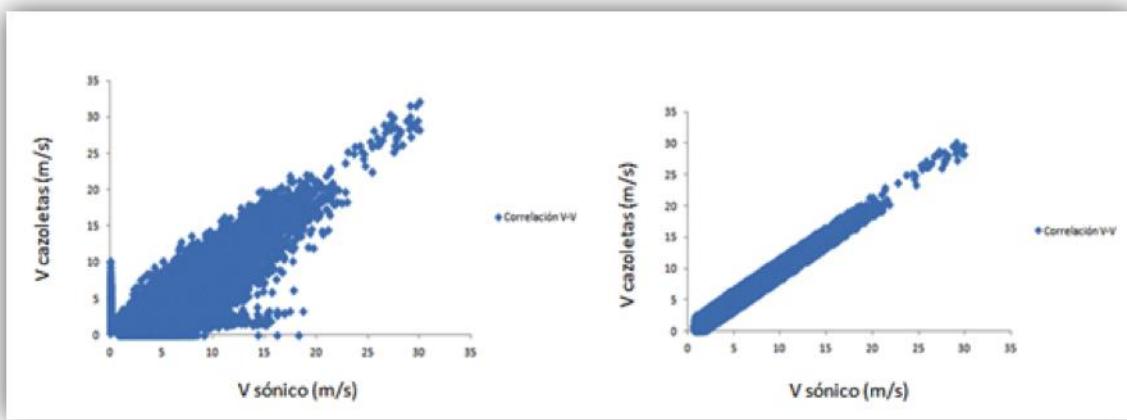
Se eliminan de la base de datos los grupos de datos adquiridos bajo las siguientes circunstancias:

1. Condiciones externas diferentes a la velocidad del viento que están fuera del rango normal de funcionamiento del aerogenerador.
2. Fallo del aerogenerador.
3. Desconexión manual del aerogenerador o en modo de pruebas o mantenimiento.
4. Dirección del viento fuera del sector o sectores de medida.
5. Dirección del viento fuera de sectores correctamente calibrados.

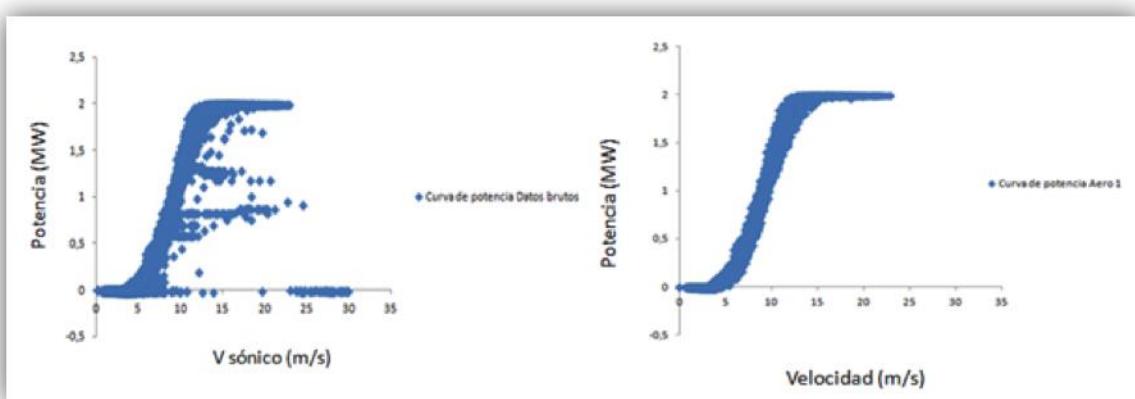
Localización de registros erróneos

Para localizar este tipo de datos se ha procedido de la siguiente manera:

- **Gráficas comparativas:** Inicialmente, se realiza una comparación visual entre la velocidad de los anemómetros (dos de tipo cazoletas y dos de tipo sónico) en contraste con la temperatura. De esta manera se pueden localizar rápidamente las principales perturbaciones de los registros (clavadas, registros erróneos...).
- **Filtros:** Tras analizar gráficamente tanto la velocidad de los anemómetros como la potencia de los aerogeneradores, se puede proceder de una manera rápida hacia la depuración de estos datos. Las gráficas comparativas serán V-V y V-P.
 - **V-V:** Se estudiaron las comparativas de los anemómetros de cazoletas y sónicos entre sí. Así como, la correlación entre sónico-cazoletas. El eje X de la gráfica lo ocupará el anemómetro sónico y en el eje Y se situará el de cazoletas, que será la variable puesta a estudio ya que es la más expuesta a este tipo de perturbaciones.



- **V-P:** La curva de potencia también fue sometida a un riguroso filtro para evadir los datos registrados que afectaban a los registros útiles.



Los sensores, así como también los registradores, sufren anomalías en las medidas. Los datos filtrados no se desechan sino se marcan con un código (-1000) para una posible recuperación en los cálculos posteriormente.

Tabla 4. Datos generales del parque de estudio

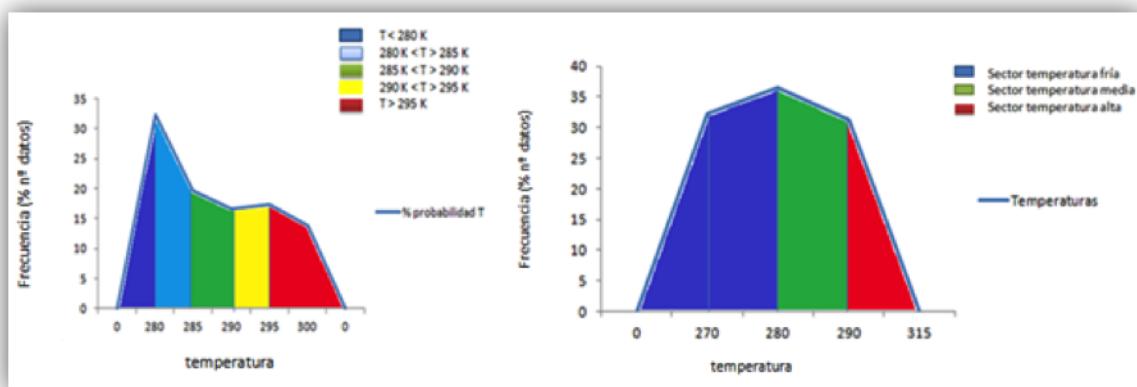
	<i>Parque estudio (nº datos)</i>	% datos útiles
<i>Anemo Pral</i>	18364	70,45
<i>Anemo 3_D</i>	24570	94,26
<i>Potencia</i>	24451	93,81
<i>Total datos</i>	26064	

3.2.1. Clasificación de datos

Debido a las condiciones a las que el terreno está sometido, se deben agrupar los datos según su implicación e influencia. Para este estudio, se han tenido en cuenta la temperatura y la dirección del viento.

Temperatura

Para conocer la influencia de la temperatura se ha clasificado el registro de datos de temperatura en cinco sectores. Tras realizar un primer análisis, se toma la decisión de acotar el registro en tres sectores debido a la escasa representatividad que ofrece alguno de los sectores en relación con la velocidad. Una vez aplicado el segundo criterio, se obtiene una gráfica de temperaturas más estable y con menos incertidumbre en sus resultados.



Gráfica 7. Sectorización de los datos de temperatura. (5 sectores y 3 sectores)

Características de cada sector:

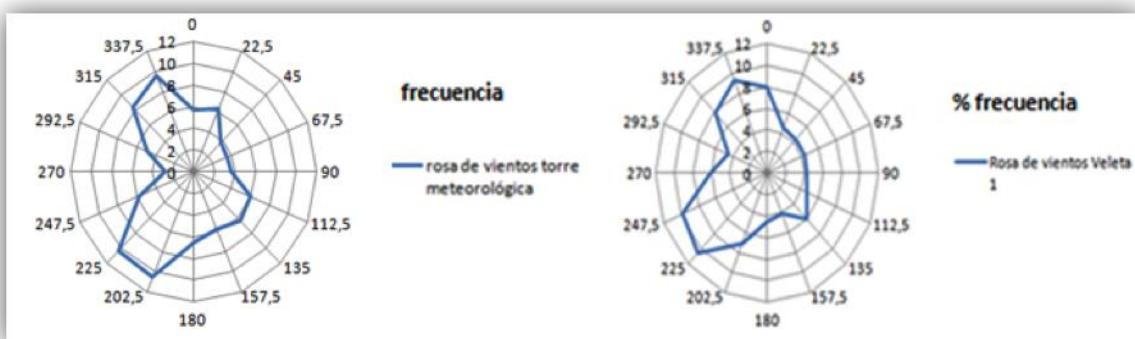
- Sector 1: Representa las temperaturas frías, por debajo de 280 K. En este se producen variaciones tanto en densidad como en la fricción mecánica propia del anemómetro. El sensor tiene la probabilidad de sufrir una congelación, escarcha o deposición de nieve.
- Sector 2: Se reflejan temperaturas medias, comprendidas entre 280K y 290 K. La mayor aportación de estos datos son la poca representatividad en la influencia de los

parámetros estudiados, lo cual sirve para clarificar la influencia sometida en sectores más extremos.

- Sector 3: Aquí se ubican las temperaturas cálidas, temperaturas mayores a 290 K.

Dirección del viento

La agrupación de estos datos, sirve para clasificar la dirección del viento predominante en nuestro emplazamiento. Para ello se realiza la rosa de viento, que clasifica los datos en 16 sectores de dirección, agrupando los datos arrojados de las dos veletas de la torre meteorológica y los aerogeneradores sometidas a estudio. Una vez realizada, se opta por coger la rosa de vientos que mejores condiciones representa, en este caso la veleta 1 perteneciente al aerogenerador.



Gráfica 8. Izquierda, rosa de viento torre meteorológica; Derecha, rosa de vientos aerogenerador

Para que los datos sean más resolutivos, los datos menos representativos serán obviados debido a su escasa influencia y para reducir lo más posible la incertidumbre que puedan verter al estudio. Tras observar la rosa, se puede determinar que existen dos direcciones principales, que son con las que se ha trabajado en el estudio.

3.2.2. Aplicación del método

Para desarrollar el método que permita conocer la influencia de la temperatura en los anemómetros de cazoletas se han utilizado dos algoritmos de Medición-Correlación-Predicción (MCP). Por un lado el algoritmo de regresión lineal y por otro el método de discretización de bines.

El método de discretización de bines logra mejores resultados teniendo en cuenta la medida de la velocidad media. Por otro lado, la regresión lineal tiene problemas ya que minimiza la suma total de los residuos dando como resultado un ajuste mejor en rangos de velocidad con más datos, lo que perjudica el ajuste en bines de velocidad con menor número de datos.

Una vez se ha desarrollado el método de los bines, se distribuyen los resultados en grupos de temperatura y dirección. En este caso, tres sectores de temperatura y dos de dirección.

4. RESULTADOS

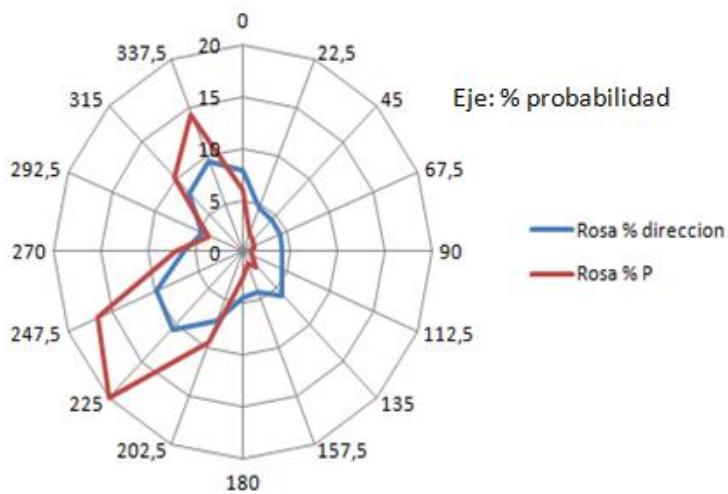
Estudio del parque

Con los datos obtenidos, se realiza una comparativa de las velocidades registradas en los anemómetros. Se decide utilizar el método de los bines para el resto de cálculos debido a su menor incertidumbre respecto a la regresión lineal.

Descripción de los sensores:

En esta parte se clasificarán los datos técnicos más importantes del emplazamiento:

Rosa de viento y potencia. Datos brutos

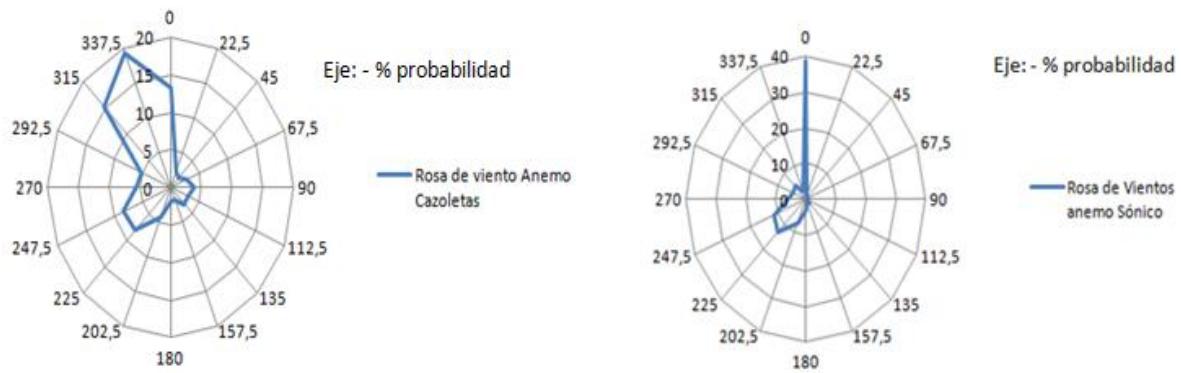


Gráfica 9. Rosa de viento y potencia datos brutos

Se diferencian dos grandes sectores donde la potencia desarrollada es más incidente. Con esta rosa de viento se caracteriza el emplazamiento, el cual a simple vista tendrá dos sectores que tendrán que ser analizados con cierta periodicidad.

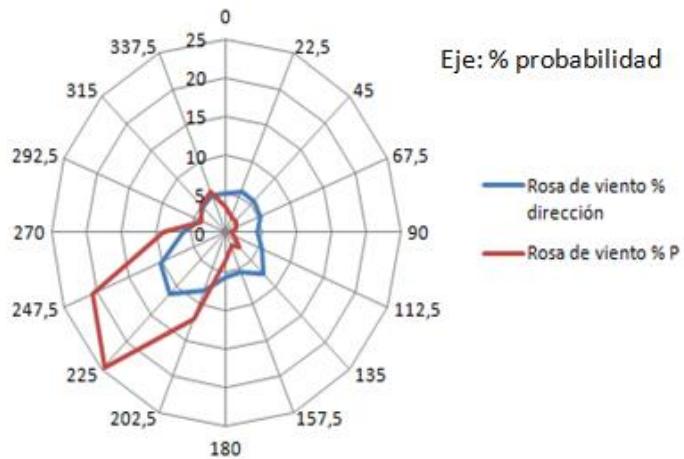
Tras aplicar la metodología de trabajo sobre el emplazamiento, se obtiene una nueva rosa de viento y potencia. Para ello, se aplican diversos filtros con el fin de depurar los datos y obtener una menor incertidumbre a la hora de trabajar con ellos.

En estas rosas se muestran los datos erróneos y que no se han utilizado para la resolución del proyecto. Como se aprecia, los datos pertenecientes a una de las direcciones predominantes contiene un alto número de mediciones inexactas y que por lo tanto producen desviaciones importantes a la hora analizar el computo general de los datos.



Gráfica 10. Direcciones de viento de los datos erróneos (Izq. Anemo caz; Derecha. Anemo sónico)

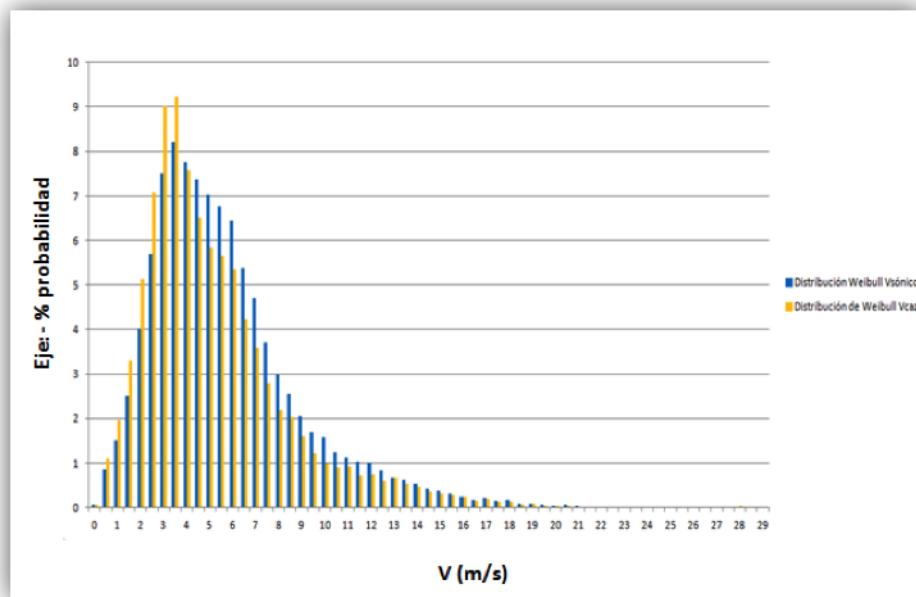
Una vez aislados estos datos, se vuelve a generar una nueva rosa de vientos. Esta, nos mostrará la veracidad de los datos del parque. En este caso, para el desarrollo de los resultados se utilizaron los datos referentes a la dirección D1, los cuales no se vieron contaminados por diversos factores tanto ambientales como técnicos.



Gráfica 11. Rosa de viento y potencia datos útiles

Distribución de Weibull del emplazamiento

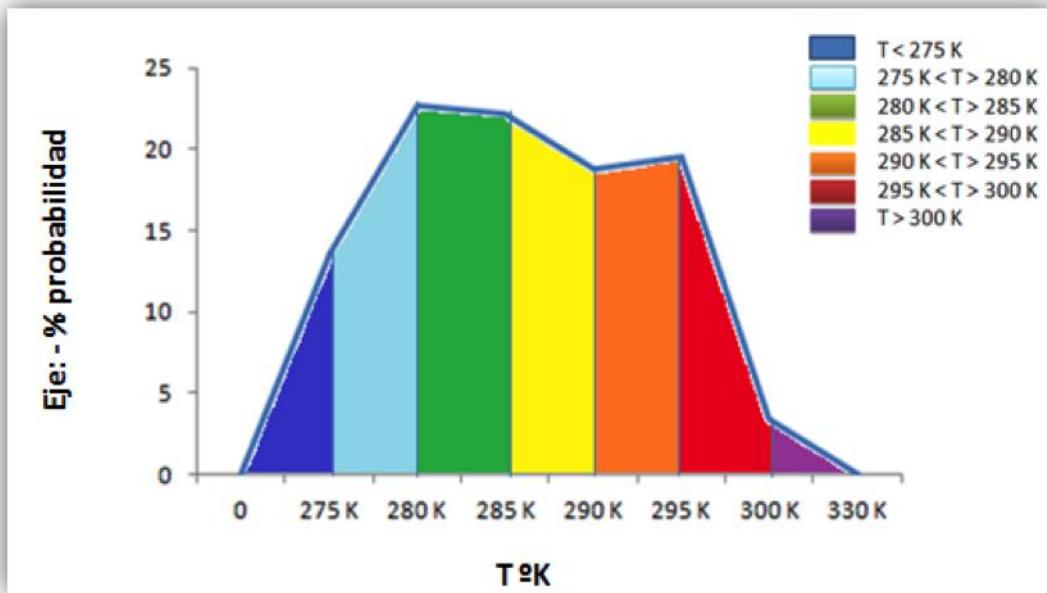
En color amarillo tendremos la distribución perteneciente al anemómetro de cazoletas y en color azul la del anemómetro 3D (sónico).



Gráfica 12. Distribución Weibull del emplazamiento

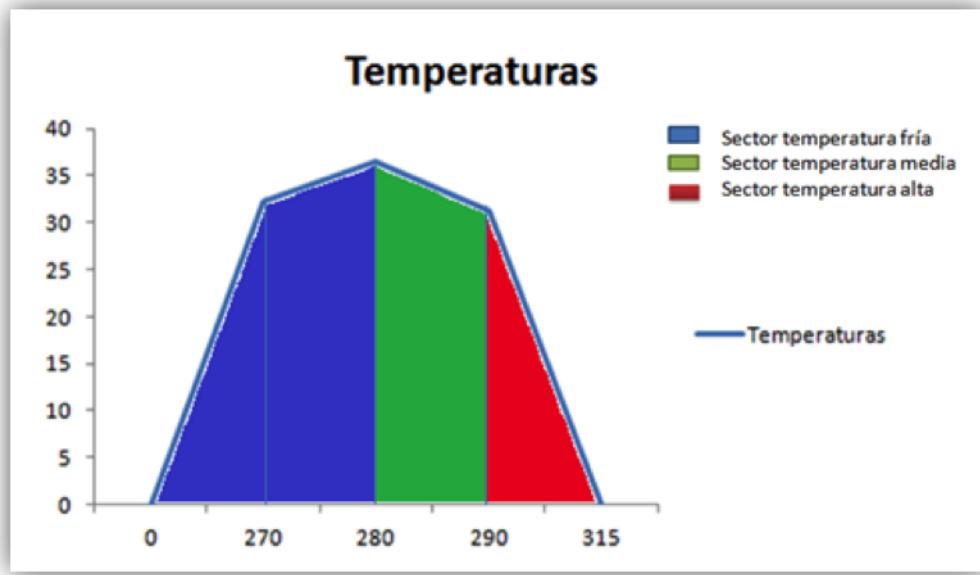
Clasificación de la temperatura

Se clasificaron las temperaturas del emplazamiento para observar si existía algún desequilibrio en sus proporciones. Como se aprecia, se trata de una situación donde una gran parte de sus medidas oscilan entre 280-285 °K.



Gráfica 13. Sectorización por diferentes temperaturas

Para intentar generar la menor incertidumbre posible, se hizo una clasificación de 3 rangos de temperatura: 1) $T < 280^{\circ}$. 2) $280^{\circ} < T > 290^{\circ}$. 3) $T > 290^{\circ}$.

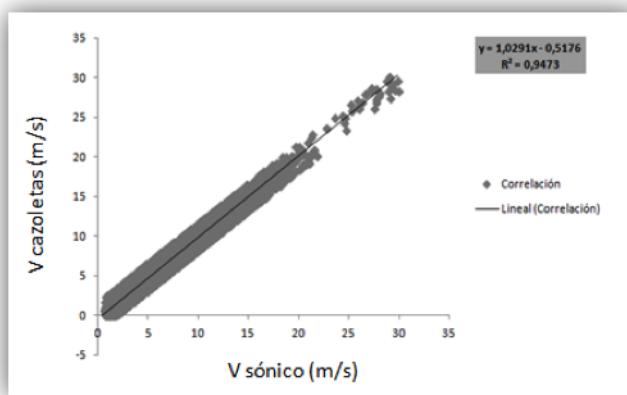


Gráfica 14. Clasificación en 3 sectores de temperatura

Influencia de la temperatura en la recta de regresión

Tras efectuar el filtrado de datos de este parque, se realiza la recta de regresión, enfrentando el anemómetro sónico (eje X) y el anemómetro principal de cazoletas (eje Y).

Como se aprecia en la gráfica, la recta muestra una amplitud en sus registros. A simple vista no se detalla ninguna desviación que pueda producir una perturbación en los resultados.



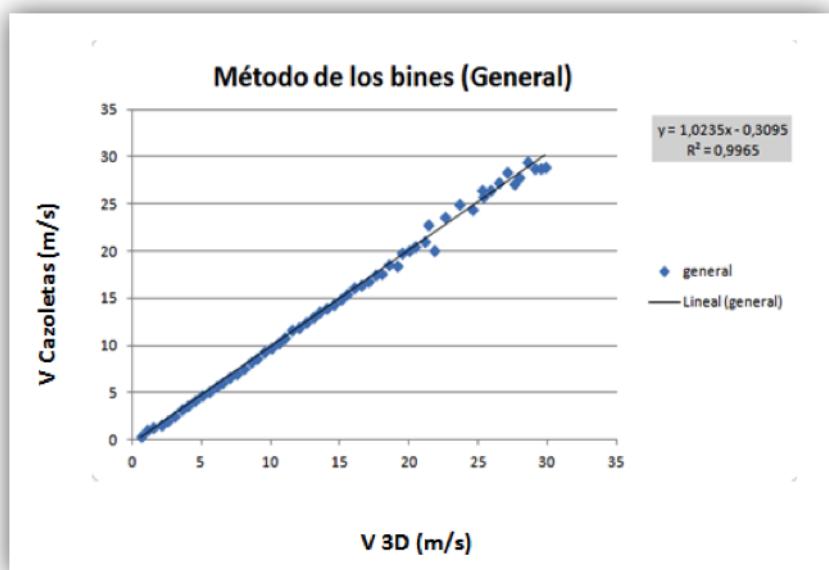
Gráfica 15. Recta de regresión del estudio

Para poder ser más efectivos en esta caracterización, el siguiente paso será aplicar el método de los bines.

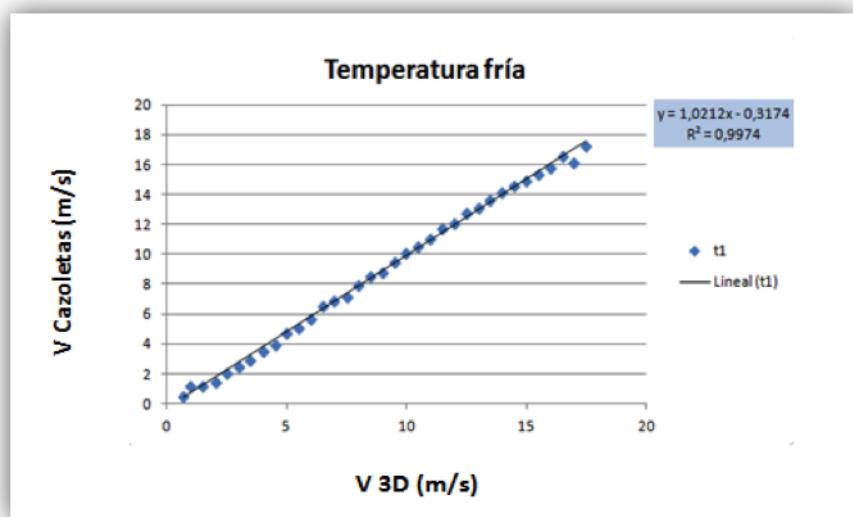
Método de los bines

Este apartado muestra los resultados obtenidos en el parque del estudio. Son estos datos los que guiarán los pasos de este proyecto, ya que son los más completos porque analizan la parte correspondiente a la velocidad de los anemómetros y la potencia desarrollada por el aerogenerador.

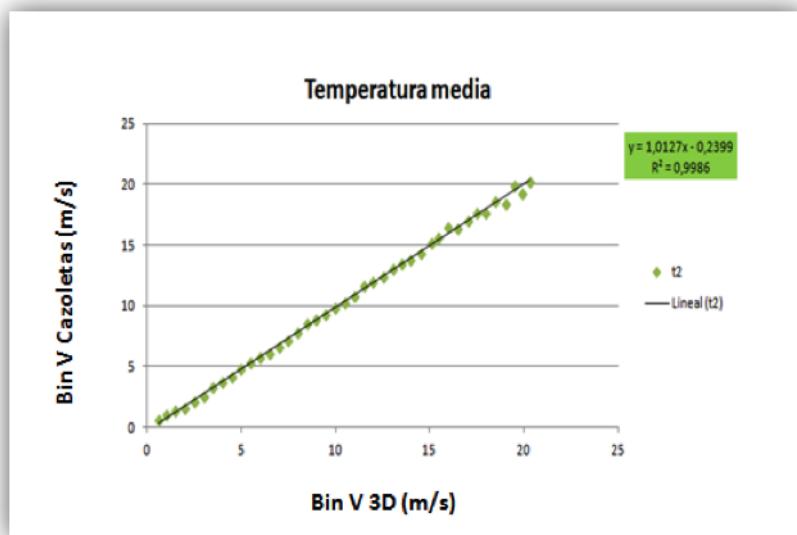
Como se muestra seguidamente, y después de hacer un exhaustivo filtro, se clasifican los datos en una comparativa general y en tres sectores de temperatura. Ya que el objetivo principal es mostrar las variaciones del anemómetro de cazoletas, se aplica el método de los bines sobre los datos de velocidad del anemómetro sónico puesto que ofrece unos datos mucho menos influenciados por la temperatura. De esta manera, se podrán ver las posibles variaciones a las que se ve sometido en anemómetro de cazoletas con respecto a la temperatura.



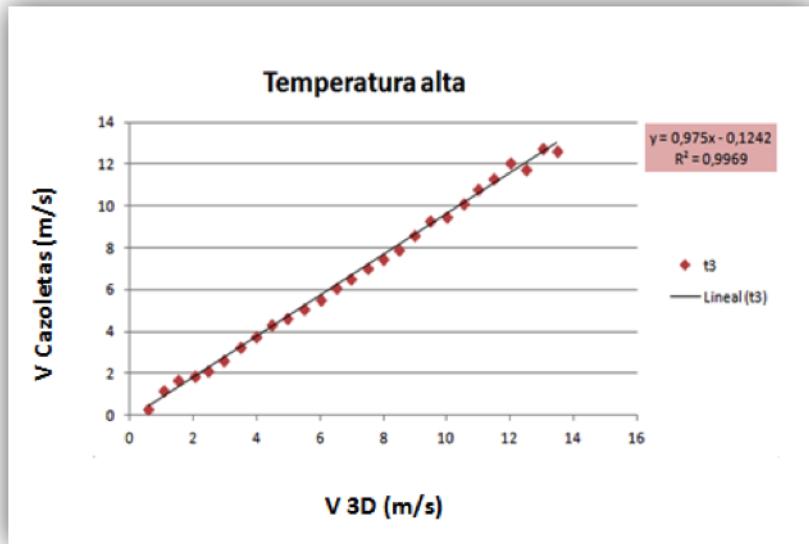
Gráfica 16. Relación general bin a bin entre sendos anemomómetros



Gráfica 17. Relación bin a bin sector temperatura fría



Gráfica 18. Relación bin a bin sector temperatura media



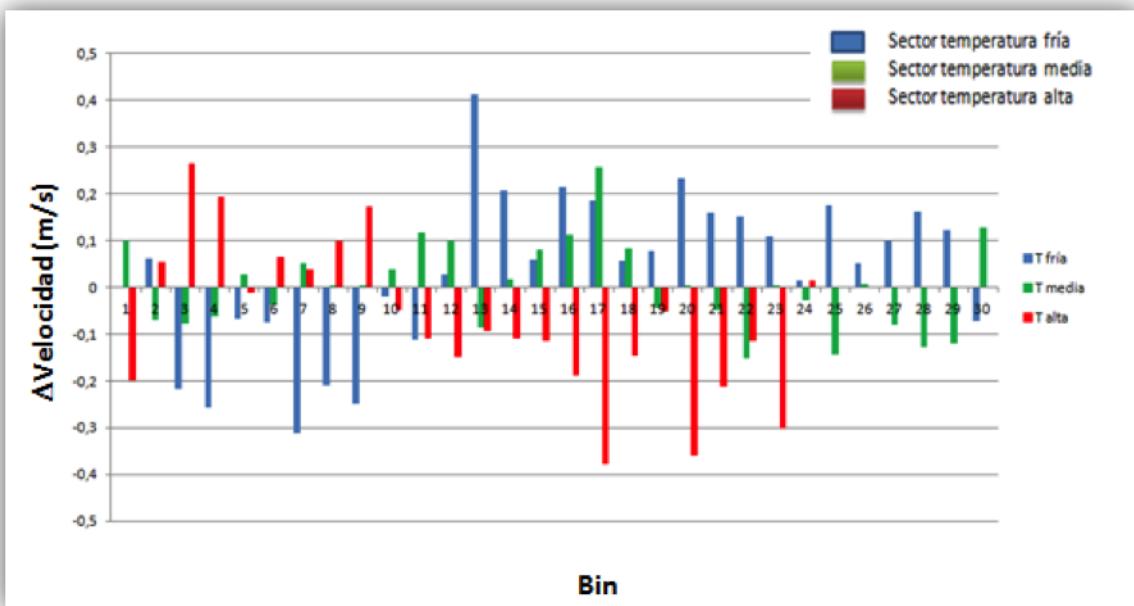
Gráfica 19. Relación bin a bin sector temperatura alta

Tras analizar las diferentes rectas ofrecidas mediante el método de los bines, se observa que la pendiente de la recta decrece a medida que aumenta la temperatura. Lo cual nos indica en primer lugar, que los registros de viento de temperaturas frías son más rápidos.

Para analizar correctamente los resultados, se ha estudiado el comportamiento de los anemómetros frente a dos variables que producen perturbaciones en los mismos, la densidad del aire y la fricción mecánica producida por los rodamientos del anemómetro de cazoletas.

El primer análisis, es visual, para tener una comprensión global de cómo responden los sensores a sendas agrupaciones. Seguidamente, se analizarán las diferencias producidas entre el esquema general y sus diferentes grupos, tanto de temperatura (Tfria, Tmedia, Talta) como de dirección (D1). De esta manera se podrá apreciar de una manera más precisa los efectos producidos cuando se somete a estudio cada parte.

Esta gráfica muestra las diferencias existentes bin a bin entre los datos generales y cada sector de temperaturas. De esta manera, se puede observar el comportamiento de cada sector de manera individual frente al comportamiento general del anemómetro.



Gráfica 20. Diferencia bin a bin entre la comparativa general y cada sector de temperaturas (anemómetro de cazoletas) Parque estudio

Fricción

Según la normativa de calibración Riso, la fricción es mayor cuando la temperatura es más baja y la velocidad de rotación es más alta.

Tal y como se ve en el gráfico comparativo, en los primeros bins la temperatura fría está por debajo. Esto nos hace indicar el efecto que puede estar teniendo la fricción, ya que para velocidades bajas a diferentes temperaturas, la fricción puede ser determinante en el comportamiento. Son velocidades comprendidas entre 1-5 (m/s). También se estudió la temperatura media que existe en este intervalo, 275,81 K en referencia al parque del estudio, frente a los 277,04K del parque de Walqa, que sirve de apoyo para los resultados. De aquí se extrae, que este emplazamiento tiene unas condiciones más adversas y que por consiguiente, el estudio de estos fenómenos es más determinante. Seguidamente, los bins cambian y se sitúan en la parte superior del gráfico. Este fenómeno es producido por la densidad.

Densidad

La densidad del viento es un parámetro muy importante en las lecturas de velocidad y potencia, ya que el rendimiento del parque puede cambiar sustancialmente. Según se detalla en el artículo [13], la densidad del aire afecta a la calibración de los anemómetros de cazoletas. Como antes se ha detallado, la calibración de un anemómetro tiene dos parámetros importantes, la pendiente y el offset. Tras someter al anemómetro de cazoletas a fluctuaciones de densidad entre 0,05-0,1 Kg/m³, el comportamiento de la pendiente (A) se desregula ofreciendo unos registros por encima de los valores testados, esto produce que los registros del sector de temperaturas frías ofrezcan unos resultados por encima de la media.

Prueba de ello es que en sendos estudios, las gráficas siempre quedan clasificadas por sectores de temperatura, siendo determinante el papel que juegan en las medidas.

Tras analizar las densidades de cada sector de temperaturas obtenemos:

Tabla 5. Densidades medias de cada sector de temperaturas

	Densidad [Kg/m³]
Temperatura fría	1,2198
Temperatura media	1,1793
Temperatura alta	1,1369
Comparativa general	1,1738

Las variaciones con la comparativa general son:

Tabla 6. Variación en densidad frente a la media general de los datos

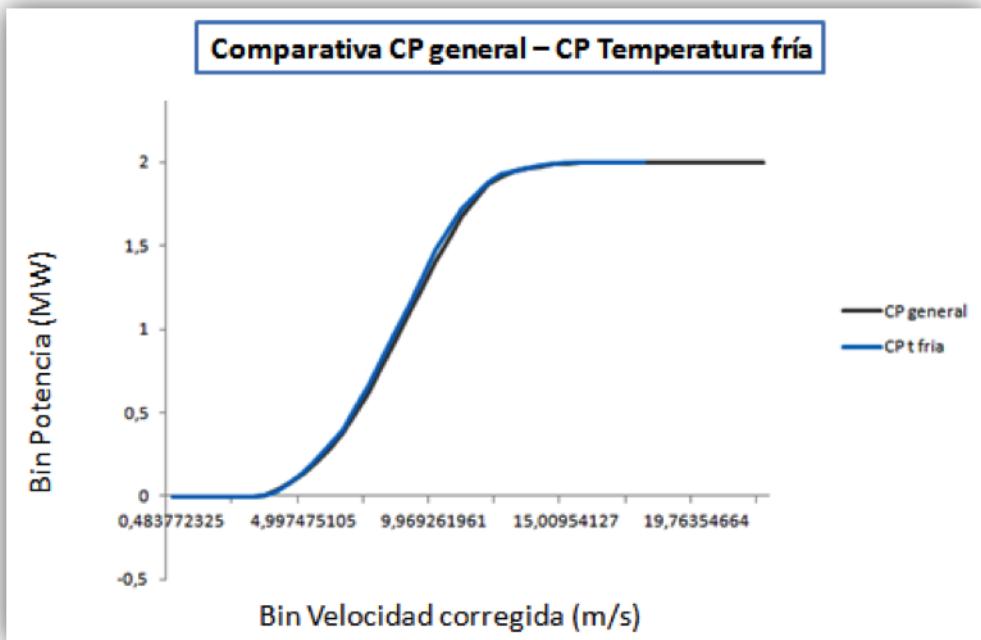
	ΔDensidad [Kg/m³]
Temperatura fría	0,046
Temperatura media	0,0055
Temperatura alta	-0,037

Como se aprecia en las tablas, la diferencia de densidad entre sectores es lo suficientemente importante como para tenerla en cuenta, y que unido a una calibración deficiente del anemómetro, muestran resultados con mayores amplitudes.

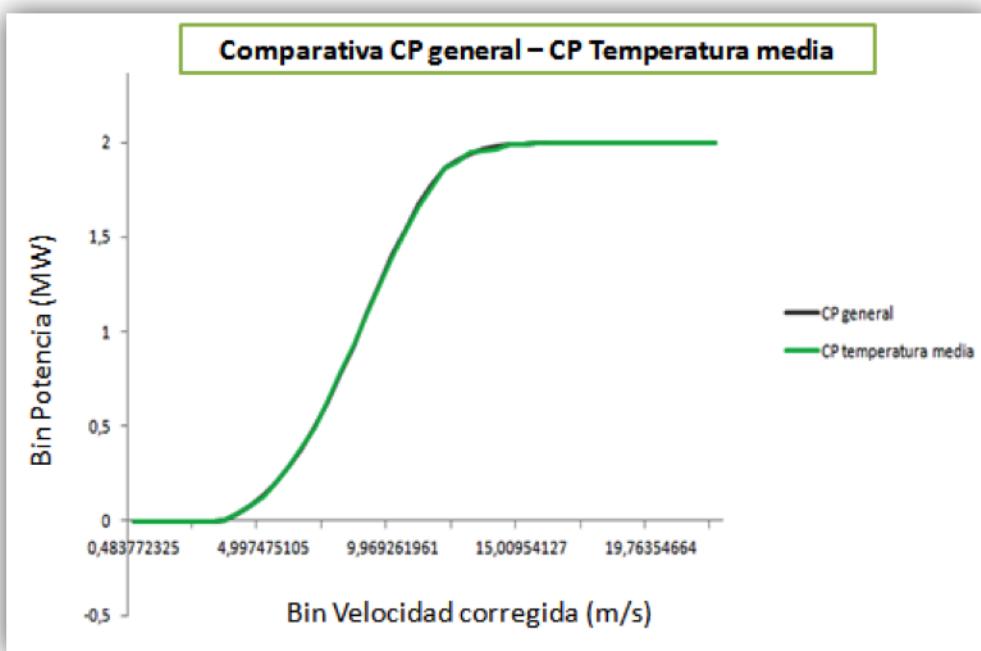
Si se hace referencia al estudio sobre la densidad antes mencionado, se puede aseverar que en este emplazamiento la densidad es un factor que hay que tener en cuenta puesto que las oscilaciones de densidad entre temperaturas frías y altas roza el 0,1 [Kg/m³]. Por lo tanto es de esperar que se produzcan perturbaciones en las medidas de velocidad.

Otro parámetro importante es la potencia desarrollada por el aerogenerador. Tras corregir las velocidades en densidad, se obtiene un gráfico totalmente clasificado por temperaturas. Los errores provocados por la densidad oscilan entre el 5% para temperaturas frías y hasta el 15% para temperaturas cálidas.

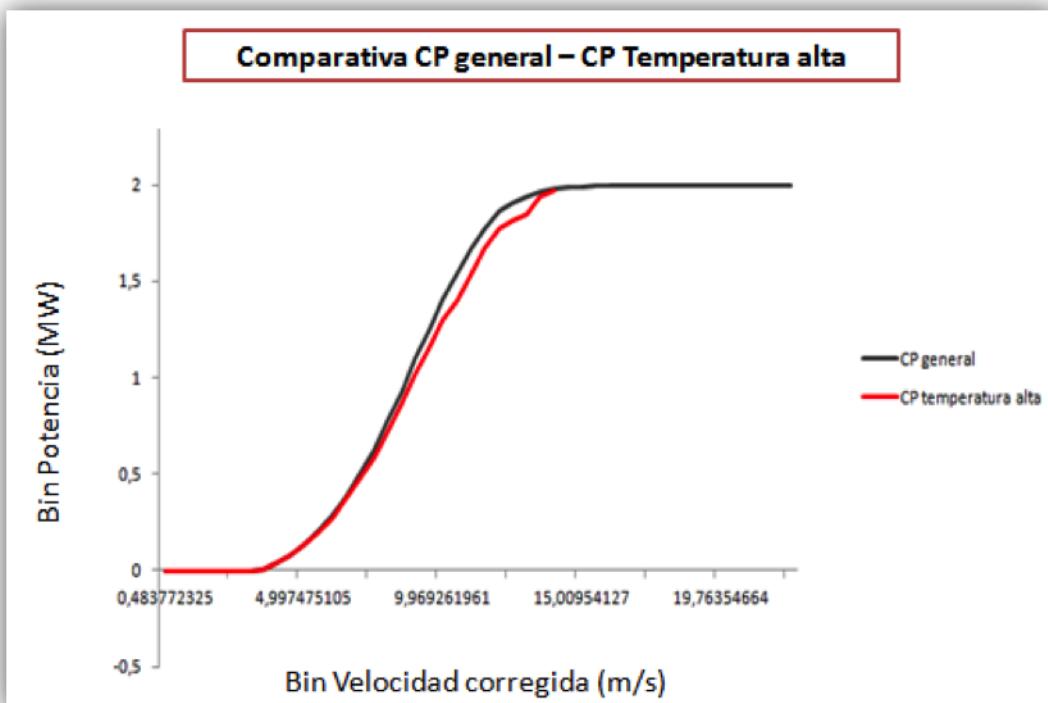
Primeramente se realiza un examen visual de las curvas de potencia para los diferentes sectores de temperatura. Como se aprecia en las siguientes gráficas, el orden de representatividad es el mismo.



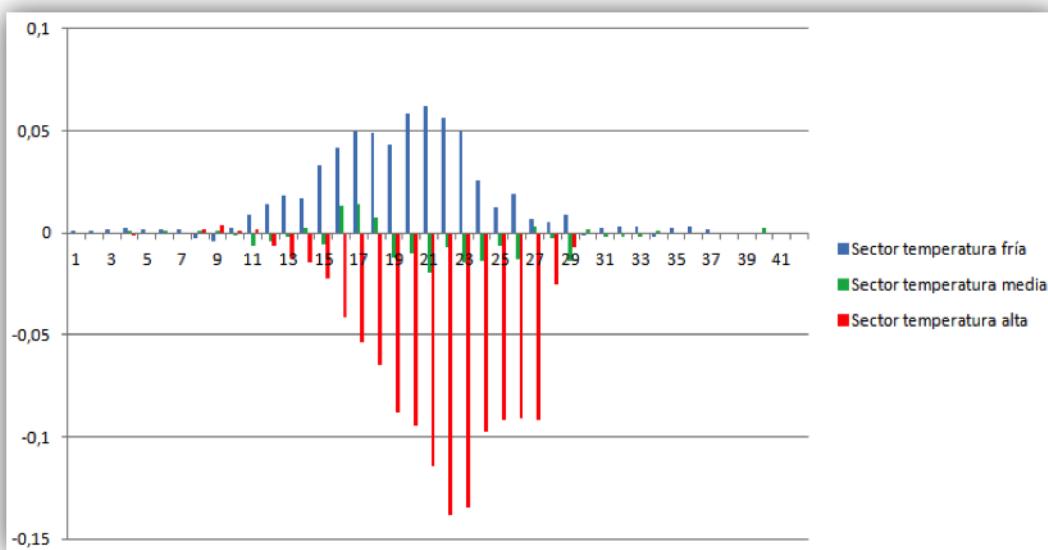
Gráfica 21. Curva de potencia General - Temperatura fría



Gráfica 22.Curva de potencia General - Temperatura media



Gráfica 23. Curva de potencia General - Temperatura alta



Gráfica 24. Diferencia bin a bin entre la comparativa general y cada sector de temperaturas (anemómetro de cazoletas) Parque estudio

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado una investigación sobre la influencia de la temperatura en la operación del anemómetro de cazoletas y los efectos que tendría a lo largo de un proyecto eólico. Partiendo de estudios anteriores, queda verificada la influencia de la temperatura sobre las medidas de velocidad de los sensores. Por ello, surge la hipótesis de realizar un estudio más exhaustivo de las variables climáticas que afectan a dichos sensores. Tras el análisis de diferentes curvas de potencia de diversos aerogeneradores en diferentes épocas del año, se focaliza dicha influencia sobre el parámetro más importante del estudio, la densidad. Para ello, se realiza una verificación en una instalación con una torre meteorológica con varios sensores donde se comparan las velocidades medidas entre un anemómetro de cazoletas y otro ultrasónico. Y por último, una replicación en los comportamientos observados en las curvas de potencia de varios aerogeneradores de un parque eólico.

El estudio constata el efecto producido en los sensores debido en gran medida a la densidad. Como ha quedado patente, los sectores de temperatura quedan totalmente ordenados debido a la densidad de cada periodo, positivamente para temperaturas más frías y negativamente para temperaturas más cálidas. Esto se ve respaldado gracias al informe sobre el cual se apoyan los resultados, ya que los parámetros de calibración de pendiente y offset se ven influenciados tras someterlos a fluctuaciones de diferentes rangos de densidad. Su significado más inmediato se aplica en emplazamientos donde la amplitud térmica es mayor, y que por consiguiente el rango de densidades varía con mayor asiduidad puesto que la temperatura es un factor que afecta directamente a la densidad. El resultado de este proceso se traduce en desviaciones tanto positivas como negativas de más del 1% en las lecturas de velocidad de los sensores. Siendo positivas cuando se trabaja en un régimen de densidades altas y el efecto contrario para densidades bajas. De esta forma, se puede concluir que dicho parámetro tiene una gran afección a la hora de diseñar un emplazamiento eólico, puesto que una buena caracterización del perfil del viento garantizaría una inversión más segura.

Otro parámetro de diseño importante en un proyecto eólico, pero en menor medida sería la fricción mecánica de los anemómetros de cazoletas. Tras el estudio de este parámetro, se observa que su principal afección se produce para temperaturas extremadamente frías, agravándose en velocidades de rotación más elevadas. En el caso de nuestro estudio, la fricción se ve reflejada en los primeros bins de velocidad de los registros fríos (1-5 m/s), donde la temperatura media de los registros es de 275,81K. Debido a ello, se atenúan las medidas de velocidad pertenecientes a este intervalo. Cabe destacar, que estas afecciones en términos generales no provocan una gran desviación en términos productivos puesto que ambas situaciones se sitúan en la velocidad de arranque y posterior a la velocidad de corte.

Una vez instalado el parque eólico, el principal objetivo de la operación es la optimización de la producción. Como anteriormente se ha expuesto, la curva de potencia de un aerogenerador está influenciada por la densidad del aire. La densidad es dependiente de la temperatura y la velocidad que registra el aerogenerador para el control está influenciada por la temperatura. De esta manera, el dibujo de la curva de potencia también quedará clasificado por sectores de

temperatura, quedando por encima de la misma, registros de densidad más altos y por debajo la agrupación de densidades más bajas.

La principal limitación de este estudio, es la falta de datos recopilados. Estos abarcan diferentes períodos del año, pero no su totalidad. La adición de parámetros como desviaciones típicas de los registros de viento, así como valores máximos y mínimos de los mismos, otorgarían más solidez al estudio.

El estudio realizado muestra grandes incertidumbres debido a la dependencia con la temperatura, mayores que el límite marcado en calibración por MEASNET del 1% por lo que sería recomendable una calibración en la que se tuviera en cuenta la influencia de la temperatura haciendo ensayos a distintas temperaturas propias de la operación a grandes alturas en parques eólicos.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. [61400-12], I. S. «Wind turbine power performance testing», 2008.
2. 61400-12-1, I. «Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines» pp. 1-101, 2005.
3. 61400-12-2, I. «Power Performance of Electricity Producing Wind Turbines based on Nacelle Anemometry», 2008.
4. Beltrán, J. «Técnicas de estimación y filtrado para la implantación y el control de la producción de parques eólicos, Zaragoza: Tesis Doctoral», 2011.
5. Gil, E. «Análisis de la influencia de la temperatura en la operación de anemómetros», 2013.
6. Klug, A. A. «Open Field Cup Anemometry» EWEC, 2001.
7. Mattio, H., & Tilca, F. «Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores», 2009.
8. Measnet. «Evaluation of site-specific wind conditions», 2009.
9. Miranda, J. J. «Estudio y planificación de un parque eólico», 2008.
10. Mur, J. «Sensores utilizados en energía eólica», 2004.
11. Paulsen, T. F. «Classification of Operational Characteristics of Commercial Cup-anemometers» EWEA, 1999.

12. Pedersen, T. F., & Paulsen, U. S. «*Classification of operational characteristics of commercial cup-anemometers*», 1997.
13. Pindado, S., Sanz, A., & Wery, A. «*Deviation of cup and propeller anemometer calibration. Results with air density*», 2012.
14. Sanz, A. «*Statistic analysis of large calibration series of NRG Max. 40 cup anemometer in wind tunnel*» EWEA, 2003.
15. Hanby, V.I. « Error Estimation in Bin Method Energy Calculations», 1995.

7. ANEXOS

7.1. Anexo Parque Walqa

Emplazamiento de Walqa

El emplazamiento de Walqa servirá como apoyo a los datos arrojados por el otro parque, en aras de una mayor claridad y comprensión de los resultados. Por ello, se hará una breve descripción de dicho lugar, puesto que se dispone de dicha información.

Se cuenta con una torre meteorológica y un aerogenerador, como se detalla en las figuras.

La torre de celosía arriostada cuenta con una serie de sensores capaces de caracterizar el emplazamiento. Estos sensores están instalados según la norma IEC 61400-12-1 [5] que minimiza las interferencias que pueden tener los brazos y los propios sensores en las respectivas medidas. La torre consta de un sensor de radiación neta, un barómetro, un piranómetro, un anemómetro vertical, un anemómetro sónico 3D, dos veletas y dos anemómetros de cazoletas (uno principal y otro de apoyo).

El aerogenerador, de tecnología VESTAS y modelo V27, se encuentra a dos rotores y medio de la torre. Esta distancia se adecua a la norma para realizar el estudio de curva de potencia. El aerogenerador de una potencia nominal de 255 kW vierte la electricidad generada en la red. Un registrador se encarga de recoger todas las señales enviadas por los sensores, los datos se descargan periódicamente para su tratamiento al utilizar una memoria circular y de esta forma evitar grabar encima de los primeros datos existentes.

Tras la descarga de datos, éstos se tratan mensualmente para realizar un seguimiento del buen funcionamiento de los sensores. En este caso, los datos se procesarán para conocer si la temperatura tiene una influencia en la medida que realizan durante su operación los anemómetros de cazoletas.

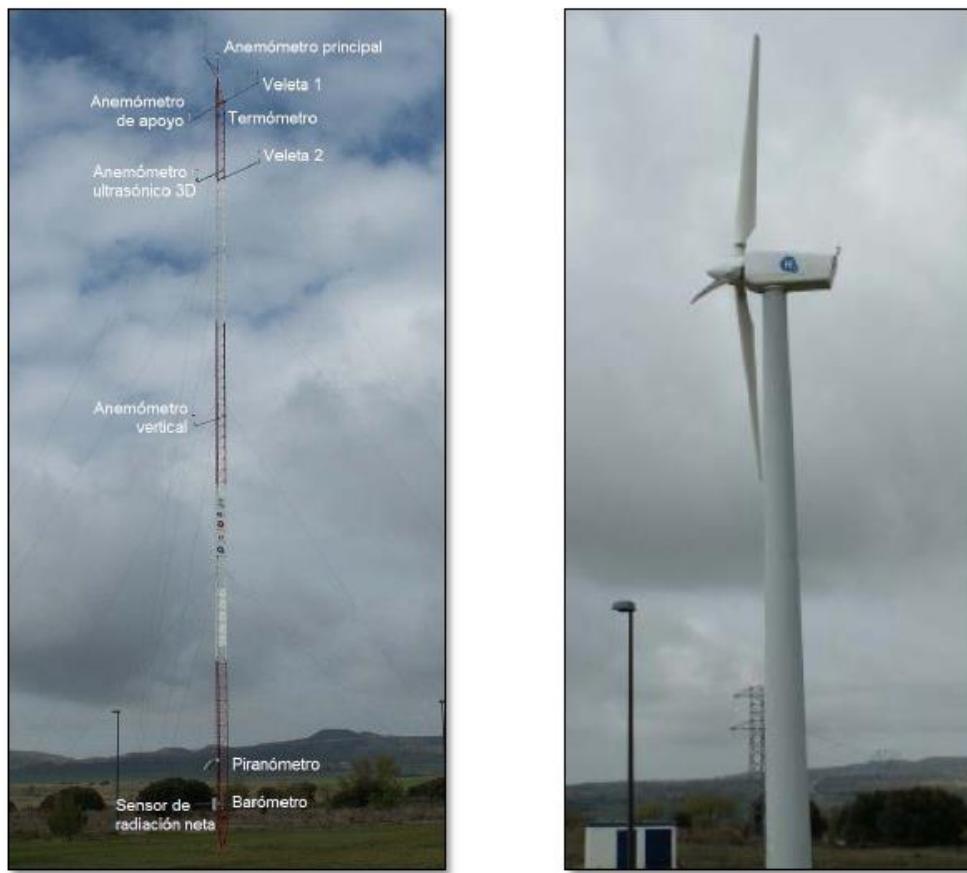
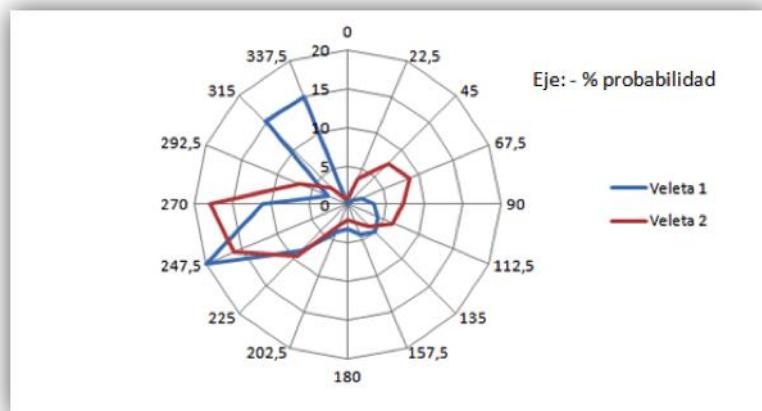


Ilustración 6. Descripción del equipo del emplazamiento de Walqa. (Torre meteorológica y aerogenerador)

Caracterización del emplazamiento

Rosa de vientos

Tras la recopilación de datos de la torre meteorológica, se clasifican los datos de las dos veletas instaladas con el objetivo de caracterizar la dirección del viento y testear su estado funcional. Con ello se obtiene la rosa de vientos.

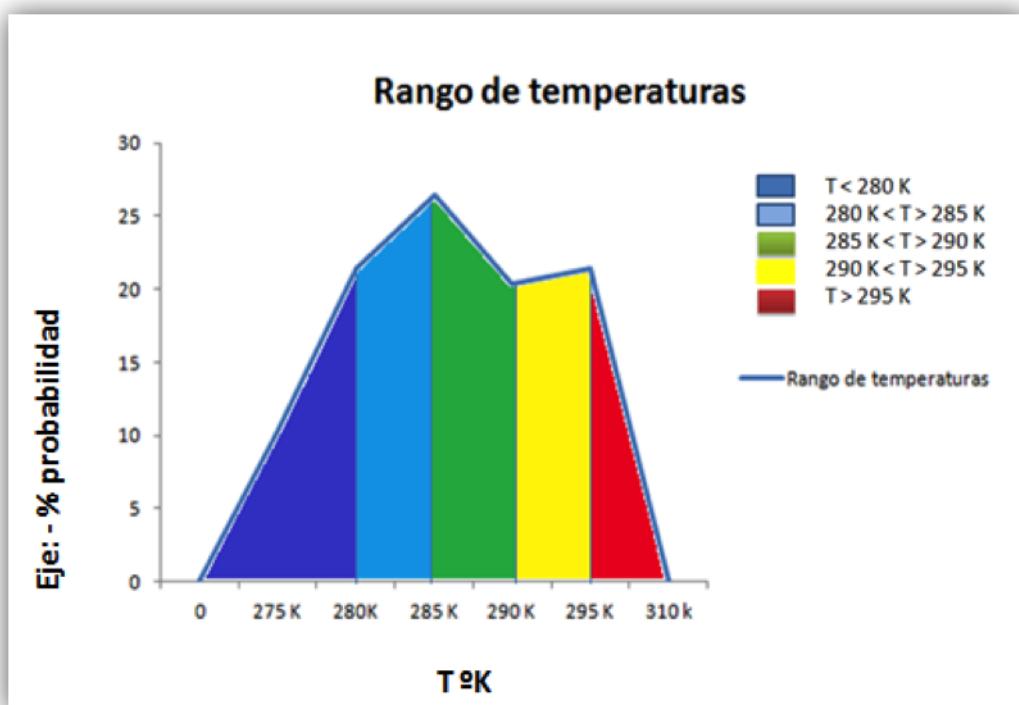


Gráfica 25.Rosa de vientos de las veletas del emplazamientos (frecuencia %)

Este emplazamiento está situado en una región donde ya están caracterizados los vientos predominantes, el cierzo y el bochorno. Se sabe que el cierzo sopla desde el oeste y el bochorno desde el este. Por lo tanto, se observa un mal comportamiento en la veleta 1, la cual recoge unos datos erróneos donde se ha producido una clavada en su registro. Por ello, en el estudio del parque de Walqa se ha desestimado la medición de la veleta 2.

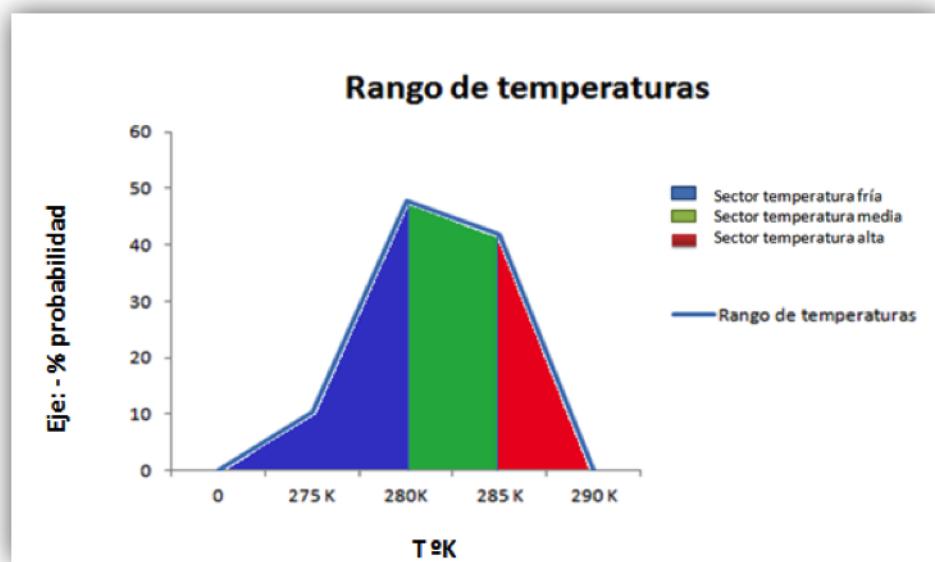
Registro de temperaturas

Para evaluar las condiciones climáticas del emplazamiento se han clasificado por sectores todo el registro de temperaturas. Esta gráfica nos muestra la probabilidad de cada sector de temperatura.



Gráfica 26. Sectorización de datos por temperatura

Para seguir con la misma línea de trabajo que el anterior caso, para los resultados, se han clasificado en tres grandes sectores de temperatura, con el fin de agrupar la mayor cantidad de datos posibles y conseguir la menor incertidumbre posible.

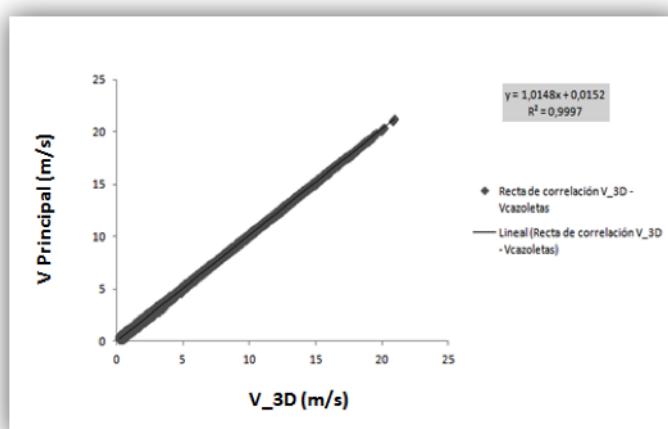


Gráfica 27. Clasificación de datos en 3 temperaturas

Influencia de la temperatura en la recta de regresión

Tras efectuar el filtrado de datos de este parque, se realiza la recta de regresión, enfrentando el anemómetro sónico (eje X) y el anemómetro principal de cazoletas (eje Y).

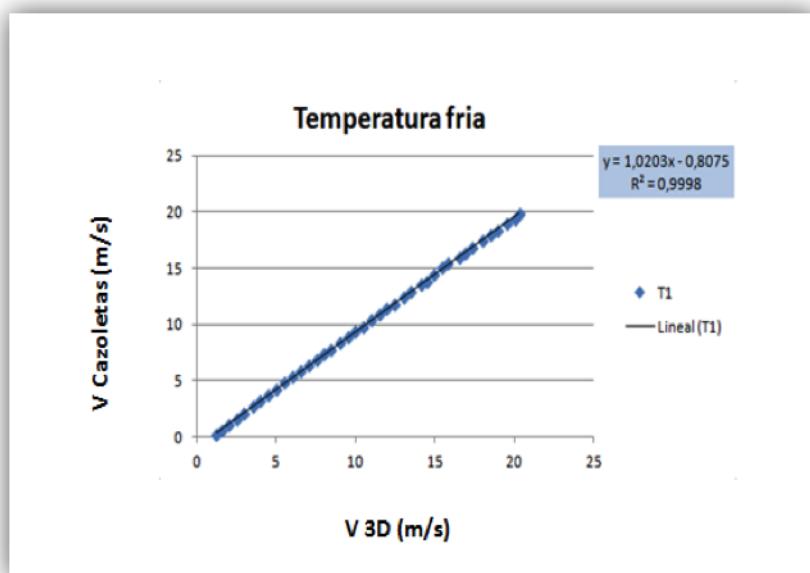
Como se aprecia en la gráfica, la recta no muestra ninguna desviación que pueda producir una perturbación en los resultados. De esta manera, el siguiente paso será aplicar el método de los bines.



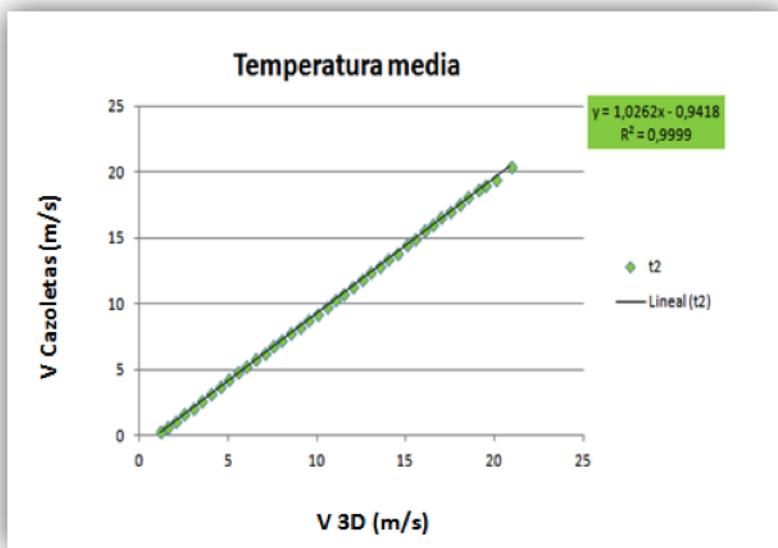
Gráfica 28. Correlación lineal entre el anemómetro sónico y el de cazoletas

Método de los bines

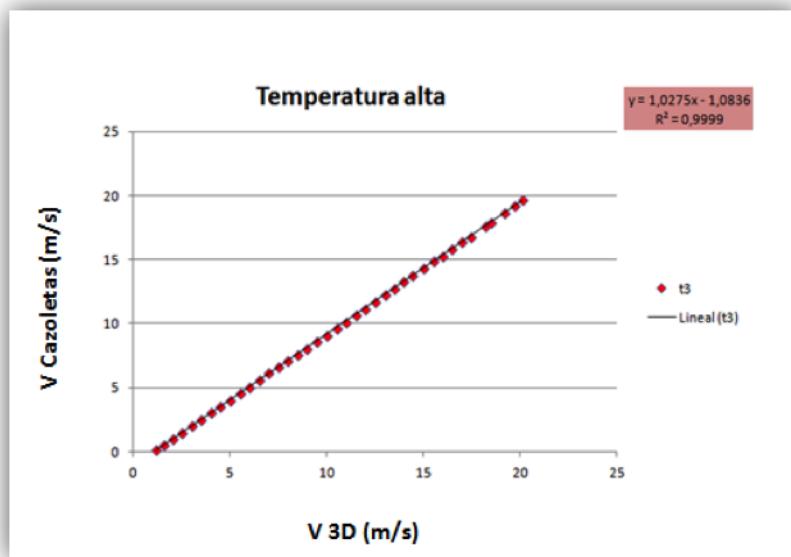
Las gráficas obtenidas en este punto hacen referencia al Parque del Walqa. Una vez sometidos los datos a estudio, se clasifican las temperaturas en tres sectores (temperatura fría, media, alta). Tras analizar las rectas de regresión se observa si existe un patrón que defina dicha influencia.



Gráfica 29. Relación bin a bin sector temperatura fría (emplazamiento Walqa)



Gráfica 30. Relación bin a bin sector temperatura media (emplazamiento Walqa)



Gráfica 31. Relación bin a bin sector temperatura alta (emplazamiento Walqa)

Tras la visualización de la recta de regresión se observa que su pendiente es creciente a medida que la temperatura aumenta. Para un mejor punto de vista, se tomarán datos y se sustituirán en la ecuación de la recta para ver el calado de la temperatura. Se marcarán en color verde las velocidades más rápidas correspondientes a cada intervalo.

Tabla 7. Registro de velocidades medias bin a bin de cada sector

V_3D (m/s)	V_Principal (m/s)		
	T fría	T media	T alta
1	0,2128	0,0844	-0,0561
2	1,2331	1,1106	0,9714
3	2,2534	2,1368	1,9989
4	3,2737	3,163	3,0264
5	4,294	4,1892	4,0539
6	5,3143	5,2154	5,0814
7	6,3346	6,2416	6,1089
8	7,3549	7,2678	7,1364
9	8,3752	8,294	8,1639
10	9,3955	9,3202	9,1914
11	10,4158	10,3464	10,2189
12	11,4361	11,3726	11,2464
13	12,4564	12,3988	12,2739
14	13,4767	13,425	13,3014
15	14,497	14,4512	14,3289
16	15,5173	15,4774	15,3564
17	16,5376	16,5036	16,3839

18	17,5579	17,5298	17,4114
19	18,5782	18,556	18,4389
20	19,5985	19,5822	19,4664
21	20,6188	20,6084	20,4939
22	21,6391	21,6346	21,5214
23	22,6594	22,6608	22,5489
24	23,6797	23,687	23,5764
25	24,7	24,7132	24,6039

Tras la sustitución, se observa que es en la temperatura fría donde el rango de velocidades es más alto. Nuevamente la densidad del aire y la fricción debida a la temperatura vuelven a ser un factor importante a tener en cuenta. La densidad del aire es un parámetro a tener en cuenta siempre. Tras los resultados obtenidos, no cabe duda de que el peso del aire tiene su influencia en el registro de datos de los anemómetros de cazoletas, ya que el bin de velocidades frías siempre es mayor.

Con respecto a la fricción de los cojinetes del anemómetro de cazoletas, según el estándar RISO, dicha influencia aumenta si la velocidad de rotación es más alta y la temperatura es más baja. Dicha influencia puede verse reflejada en las velocidades más altas. Como se aprecia en la gráfica, cada vez se aproximan más los valores hasta que son rebasados, este fenómeno puede ser debido a la fricción de las temperaturas más frías a velocidades elevadas.

Densidad

Siguiendo la línea de trabajo del anterior emplazamiento, analizamos las variaciones de densidad.

Tras analizar las densidades de cada sector de temperaturas obtenemos:

Tabla 8. Densidad media de cada sector de temperaturas (Walqa)

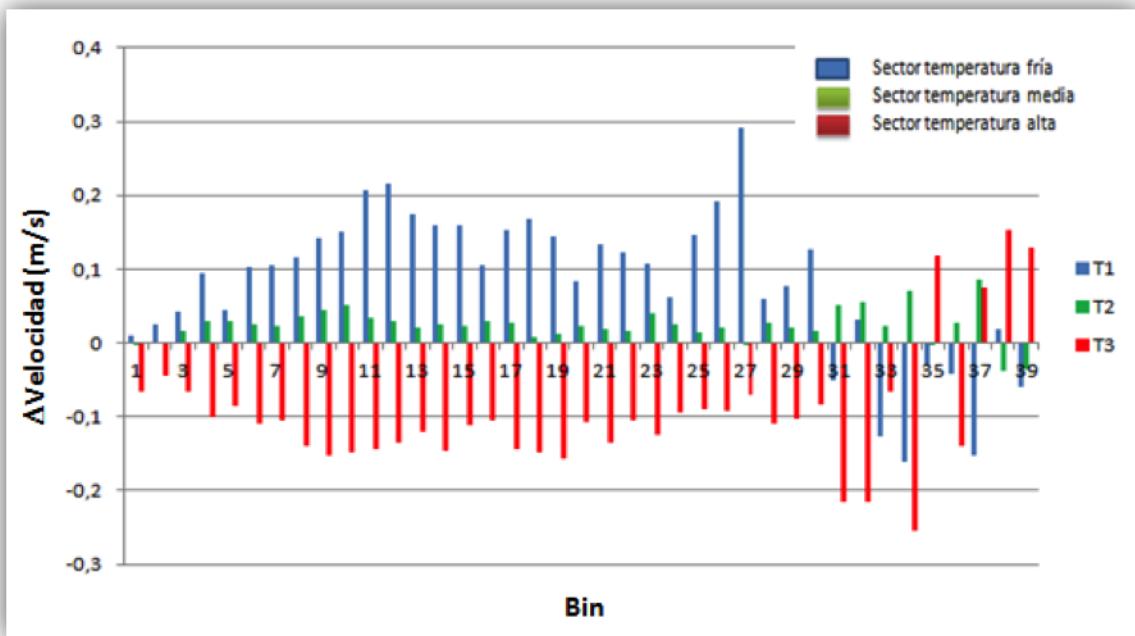
	Densidad [Kg/m ³]
Temperatura fría	1,1265
Temperatura media	1,0977
Temperatura alta	1,0568

Las variaciones con la comparativa general son:

Tabla 9. Variación en densidad de cada sector (Walqa)

	ΔDensidad [Kg/m ³]
Temperatura fría	0,0315
Temperatura media	0,0017
Temperatura alta	0,0392

El filtrado de este parque es más limpio y se puede apreciar en mayor medida el efecto producido por la densidad. En este caso los sectores quedan gráficamente ordenados. Dicha resolución gráfica nos muestra meritoriamente el efecto producido por la densidad.



Gráfica 32. Diferencia bin a bin entre la comparativa general y cada sector de temperaturas (anemómetro de cazoletas) Parque Walqa

7.2. Anexo densidad. Informe sobre las desviaciones producidas por la densidad. (Pindado, S., Sanz, A., & Wery, A. *Deviation of cup and propeller anemometer calibration. Results with air density*)

En este anexo se detallan los resultados de calibración de diferentes anemómetros cuando son sometidos a diferencias de densidad. El presente trabajo forma parte de un programa de investigación más ambicioso en el Instituto IDR / UPM para revisar y analizar gran serie de calibraciones anemómetros. [13]

En la primera tabla tenemos los anemómetros del estudio, el número de calibraciones a los que han sido sometidos y las fechas de las mismas.

Anemometer	Calibrations	From	To
NRG Systems Maximum 40/40C	1945	27/05/2003	20/01/2011
Secondwind C3	172	05/12/2007	16/02/2011
Thies Clima 4.3350	2790	25/11/2003	15/02/2011
Thies Clima 4.3351	894	03/12/2009	22/02/2011
Thies Clima 4.3303	323	11/09/2003	09/09/2010
Vector Instruments A100 L2	327	30/04/2003	05/01/2011
Vector Instruments A100 LK	656	22/03/2005	16/02/2011
Ornytion 107A	772	11/05/2004	11/02/2011
RM Young 3002/3102	199	31/03/2003	15/11/2010
RM Young 05103	266	02/11/2004	08/02/2011
IDR/UPM Anemometers	Calibrations	From	To
Climatronics 100075	64	30/01/2001	28/06/2006
Vector Instruments A100 L2	70	10/09/2003	30/10/2007
Thies Clima 4.3350	176	05/10/2006	17/02/2011

Ilustración 7. Modelos de anemómetros sometidos a estudio

Modelo A100 L2

Como antes se ha especificado, en la función ($V = A \cdot f + B$), la velocidad es dependiente de dos valores de calibración A (pendiente) y B (offset).

Tras la consecución de las diferentes calibraciones, se observa como dichos parámetros se ven influenciados por la densidad. En las figuras siguientes se detalla gráficamente la repercusión de la densidad a la hora de calibrar los anemómetros, marcando en color rojo los resultados que debería mostrar si la calibración fuese la óptima. Como se ha mencionado anteriormente, la pendiente sobreestima su valor en las mediciones cuando es sometida a cambios de densidad.

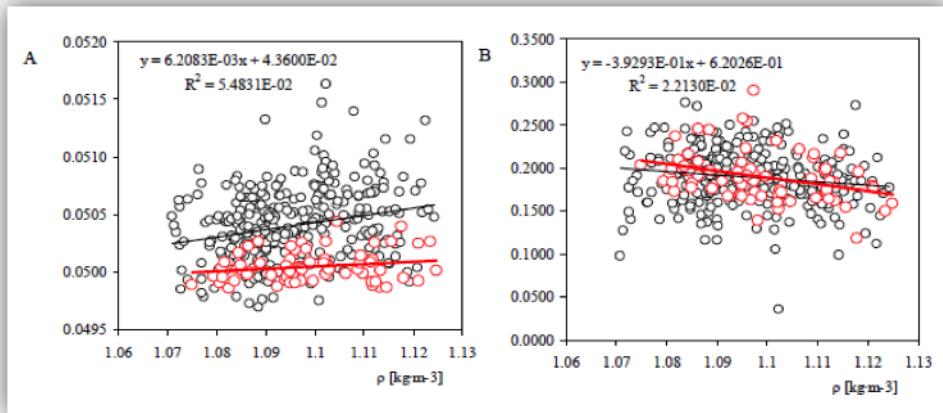


Ilustración 8. Tendencia de los parámetros A y B de calibración (modelo A100 L2)

Modelo Thies Clima 4.3350

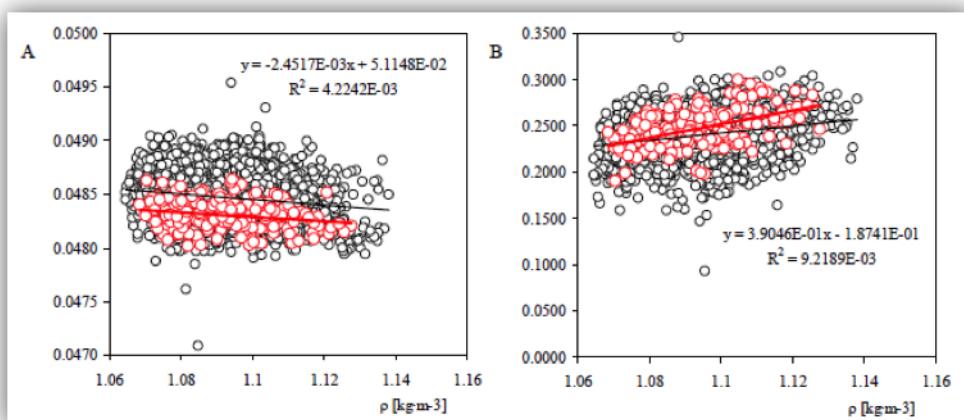


Ilustración 9. Tendencia de los parámetros A y B de calibración (modelo Thies Clima 4.3350)

Como se mencionó anteriormente, estas diferencias son bastante obvias. Como se relata en el estudio, las desviaciones estándar correspondientes a los modelos anemómetros se tienen en cuenta a la hora de la calibración de cada anemómetro. Sin embargo, gracias a esta comparación, es posible hacer una primera estimación de los valores de la desviación estándar de un solo anemómetro, basado en los datos de las calibraciones realizados en múltiples anemómetros del mismo modelo.

La oscilación de estos parámetros de calibración tiene mayor influencia a medida que la diferencia de densidad es mayor. Como se aprecia en las siguientes gráficas, las estimaciones en la desviación tanto de A como B son mayores conforme la densidad aumenta. De esta manera se puede deducir que en regiones o emplazamientos donde la densidad del aire es

mayor, estos parámetros se ven sometidos a mayores desviaciones y por lo tanto es necesario recalibrarlos periódicamente.

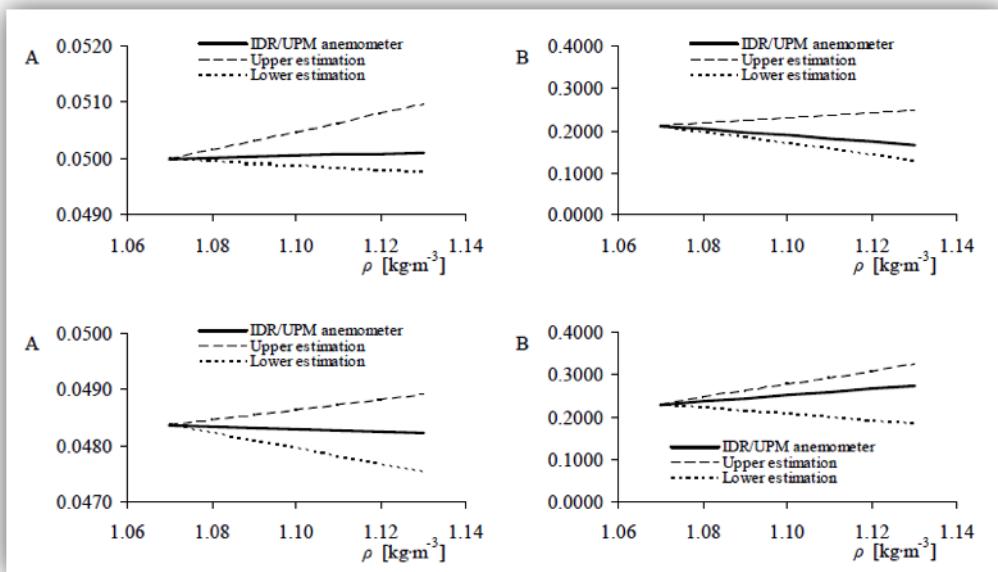


Ilustración 10. Estimaciones de desviación de los parámetros A y B

7.3. Métodos aplicados

Regresión lineal

Es la técnica más simple y aplicada para obtener un modelo lineal a partir de una serie de datos. Se obtiene una función lineal para estimar la velocidad de viento a partir de una de referencia con la ecuación:

$$V_i^{obj} = a \cdot V_i^{ref} + b$$

Donde V_i^{obj} es la velocidad de viento en el anemómetro objeto de estudio en el diezminutal i, V_i^{ref} es la velocidad de viento medida en el anemómetro de referencia en el diezminutal i, a es la pendiente de la regresión lineal y b es el término independiente de la regresión lineal.

Los parámetros a y b se calculan a partir de los conjuntos de datos comunes entre ambos anemómetros.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n [(V_i^{obj} - \bar{V}^{obj}) \cdot (V_i^{ref} - \bar{V}^{ref})]}{\sum_{i=1}^n (V_i^{ref} - \bar{V}^{ref})^2}$$
$$b = \bar{V}^{obj} - a \cdot \bar{V}^{ref}$$

Donde \bar{V}^{obj} y \bar{V}^{ref} son las velocidades medias del anemómetro objeto y referencia, respectivamente.

Se ha establecido en los últimos años en la industria eólica pero presenta inconvenientes su uso. El principal problema es la minimización de la suma total de los residuos y por tanto los rangos con más datos fuerzan a la recta a que se ajuste mejor en esos bins de velocidad.

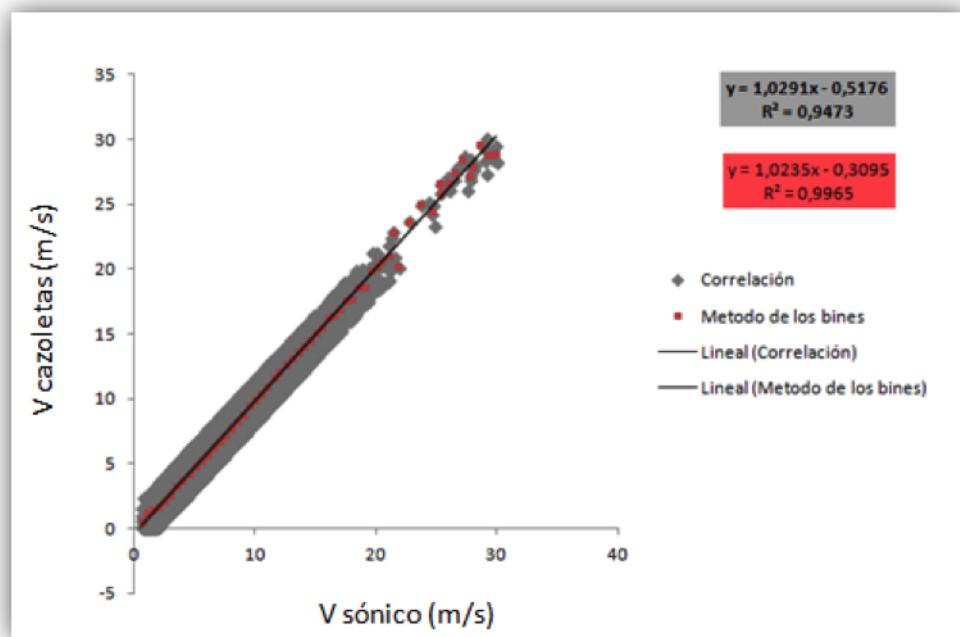
Método de discretización de bines

El método de discretización de bines ha estado en uso durante muchos años como un simple procedimiento para el cálculo de los consumos de energía. Últimamente, se ha eclipsado como herramienta de análisis dinámico por ordenador en programas de simulación. Las virtudes de la simplicidad y la transparencia se han asegurado de que se siga utilizando el método de los bines en muchas enseñanzas y aplicaciones prácticas. Además de su uso en cálculos, las ventajas de la utilización de datos agrupadas han sido de gran utilidad en el equilibrio de Simulaciones de sistemas HVAC. [15]

Su uso está normalizado en el ensayo de curva de potencia de aerogeneradores [15]. Los datos se agrupan en bins de velocidad y sectores de dirección.

Para este estudio se han dividido en bins de 0.5 m/s, en cada bin se calcula la velocidad media para el anemómetro de referencia y la velocidad del anemómetro de referencia. Se obtiene una serie de puntos para cada bin de velocidad.

Con este método se obtiene una mejor adaptación a todo el rango de velocidades, mejorando la precisión en la estimación de velocidades.



Gráfica 33. Comparativa método de los bines y regresión lineal