



PROYECTO FINAL DE CARRERA

CURSO ACADÉMICO 2010-2011

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y OTROS PARÁMETROS EN LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Autora: Inés Gomes Pérez

Directora: Ana Patricia Talayero Navales

Ponente: Andrés Llombart Estopiñán

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Titulación: Ingeniería Industrial

Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza

Fecha: Marzo 2011



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y OTROS PARÁMETROS EN LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

RESUMEN

Este proyecto ha sido desarrollado dentro del área de Análisis Integral de Recursos Energéticos del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE) y del Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Su principal objetivo ha sido averiguar en qué magnitud afectan los instrumentos de medida de la velocidad del viento a la estimación de la producción de los aerogeneradores, debido a la relación lineal que existe entre la potencia y el cubo de la velocidad. En el análisis se destaca que los anemómetros utilizados para medir la velocidad del viento se ven afectados en condiciones específicas, sobre todo con bajas temperaturas. Esta afección se vería reflejada como una desviación y, dada la relación cúbica que existe entre la potencia generada en un aerogenerador y la velocidad del viento, este hecho puntual podría decidir las estimaciones de producción. Para comparar la incidencia que tiene esta desviación se han utilizado dos tipos de anemómetros: uno de cazoletas y otro ultrasónico.

El presente proyecto se divide en varias partes. En la primera parte se repasan los conceptos generales del estudio del comportamiento del viento en un emplazamiento y, paralelamente, se estudian los datos recogidos en la instalación y se analiza el proceso de filtrado y limpieza de estos datos con los programas adecuados.

En la segunda parte se realiza una comparación de los registros tomados mediante correlaciones. De esta manera se va a poder evaluar las variables que más afectan a la velocidad, pudiéndose así corregir el desvío causado para establecer unas estimaciones de su afección a los datos de la producción calculada en un estudio de recurso eólico.

Por último, se evalúan los resultados obtenidos y se establecen las conclusiones apropiadas para fijar los procedimientos de actuación y tratamiento de los datos en situaciones en los que las condiciones climatológicas pudieran afectar al anemómetro de cazoletas.



TABLA DE CONTENIDOS

	Página
• 1.-Introducción	4
1.1- Objeto del proyecto	4
1.2- Justificación del proyecto	5
1.3- Estructura del proyecto desarrollado	5
• 2.- Descripción de la instalación	7
2.1- Introducción a la instalación	7
2.2- Sensores utilizados y variables medidas en el estudio	8
• 3.- Metodología del análisis y resultados	11
3.1- Introducción	11
3.2- Tratamiento y limpieza de los datos	11
3.3- Estudio de la relación entre las variables	17
• 4.- Análisis de la intensidad de turbulencia	23
• 5.- Estudio de la influencia de la temperatura	26
5.1- Determinación de los tramos de temperatura a estudiar	26
5.2- Variación de las velocidades en función de la temperatura	28
5.3- Resultados de las pruebas de tendencia	37
5.4- Resultados de las desviaciones porcentuales	42
• 6.- Conclusiones y posibles estudios futuros	45
• BIBLIOGRAFÍA	47
• ANEXOS	48
A.1- Potencia generada en un aerogenerador	49
A.2- Informe de la instalación	51
A.3- Muestra de los datos registrados	58
A.4- Gráficas sobre las relaciones entre las diferentes variables	69
A.5- Intensidades de turbulencia	73
A.6- Tablas de las desviaciones porcentuales	76
A.7- Resumen de todos los datos registrados	79
A.8- Cronograma del trabajo desarrollado	90



1. INTRODUCCIÓN

La energía procedente del viento ha sido aprovechada por el ser humano desde tiempos inmemorables (tanto para impulsar los barcos a través de las velas como para moler grano). La naturaleza nos cede este recurso energético de manera totalmente gratuita. Sin embargo, no fue hasta el siglo XX cuando comenzó a utilizarse el viento para producir electricidad, autoabasteciendo pequeñas instalaciones en un principio y llegando a cubrir el 14,3 % de la demanda total de energía eléctrica en 2009 (datos de la AEE, Asociación Empresarial Eólica). De esta manera, España se consolida como uno de los principales países del mundo en producción de energía eólica.

En 2009, a pesar de la crisis económica, este tipo de energía llegó a crecer en el mundo un 31% (datos de la AEE), consolidándose así como la tercera opción en el sistema eléctrico (sólo por detrás de las centrales térmicas de gas de ciclo combinado y de las nucleares).

Por ello, es de vital importancia que las estimaciones que se realizan acerca de la producción de los aerogeneradores sean lo más cercanas posible a la realidad. Teniendo en cuenta que la potencia de un aerogenerador está directamente relacionada con la velocidad del viento, los sensores encargados de medir esta variable se convierten en los de mayor importancia.

Dado que la implantación de un parque eólico requiere una importante inversión inicial y dado que la estimación de la producción depende de la velocidad al cubo y del riesgo de la inversión, es esencial que las medidas de velocidad tengan la menor desviación posible. Esta desviación tiene una gran repercusión económica ya que, generalmente, en un proyecto medio de un parque eólico una simple variación de la velocidad en un 5 % podría repercutir en variaciones de la tasa interna de retorno (TIR) cercanas al 15 %.

1.1- Objeto del proyecto

Actualmente, el instrumento más utilizado para medir la velocidad del viento dentro del campo de la generación eólica es el anemómetro de cazoletas. Este tipo de sensores tienen la ventaja de no tener un precio muy elevado y ser robustos pero, por el contrario, tienen una serie de desventajas que podrían afectar a las medidas: el par de fricción en el rodamiento que llevan incorporado, efectos dinámicos y las características de respuesta angular.

Por ello, estos anemómetros podrían verse afectados en condiciones particulares, como las bajas temperaturas. Esta afección se reflejaría como una desviación y, dado que hay una relación cúbica entre la potencia generada en un aerogenerador y la velocidad del viento, este hecho podría ser relevante en las estimaciones de producción y en el cálculo de la intensidad de turbulencia, parámetro básico a la hora de definir un aerogenerador.

El objeto de este proyecto es estudiar estas desviaciones de velocidad en base a la influencia que tiene la temperatura ambiente y otras variables en el funcionamiento de los anemómetros de cazoletas.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Para ello, se ha dispuesto de una torre de medición instalada en el laboratorio AIRE en WALQA donde, durante un periodo de dos años, se han medido diferentes variables que se citarán más adelante.

1.2- Justificación del proyecto

El presente proyecto ha sido realizado en el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE) de la Universidad de Zaragoza. Surge como respuesta a la necesidad de averiguar en qué magnitud afectan los instrumentos de medida de la velocidad del viento a dos parámetros: a la estimación de la producción y al cálculo de la intensidad de turbulencia. Dado que existe una relación lineal entre la potencia generada y el cubo de la velocidad (puede consultarse el anexo A.1 para ver los parámetros que intervienen en la producción de energía de un aerogenerador) es de vital importancia la correcta medición de esta variable ya que si se comete un pequeño error en esta medida, al ir elevada al cubo, puede suponer grandes variaciones sobre la producción estimada. Este hecho está, por tanto, estrechamente relacionado con la adecuada elección del sensor ya que cuanto mayor sea el error asociado al sensor de medida, más influirá sobre la producción de energía. Por otra parte, un error en el cálculo de la intensidad de turbulencia supondría la reducción de la vida de los aerogeneradores debido a las cargas de fatiga que lleva asociadas.

Para la realización de este proyecto se ha contado con un laboratorio de medición situado en el parque tecnológico WALQA que consta de una torre meteorológica. Ésta se instaló con dos finalidades: la primera es analizar la influencia que tienen los distintos sensores de medida sobre la velocidad del viento y, la segunda, es medir la curva de potencia de un aerogenerador que está situado justo a su lado.

1.3- Estructura del proyecto desarrollado

Para poder observar la planificación del trabajo desarrollado durante el presente proyecto y su duración, se ha elaborado un cronograma que puede consultarse en el anexo A.8. En él puede verse detalladamente cada una de las actividades desarrolladas y su amplitud en el tiempo.

El proyecto propuesto tiene una primera parte en la que se describe la instalación que ha servido para recoger los datos descargados del datalogger y se describe el proceso llevado a cabo para proceder a la limpieza y filtrado de los datos. El proceso de filtrado de datos utilizado no ha sido la eliminación de los mismos, sino el aislamiento de los valores que eran considerados incorrectos para, así, poder recuperarlos en el caso de necesitarlos. Ha sido un proceso largo y costoso ya que se ha contado con unos 80.000 datos medidos cada uno de ellos para más de nueve variables.

Una vez filtrados, se establecen relaciones entre las variables tomadas para determinar cuáles de ellas afectan directamente a las medidas de la velocidad, ya que de esto dependen las desviaciones que podrían producirse sobre los estudios estimativos de producción y los comportamientos de los aerogeneradores.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



En una segunda parte, una vez determinado que la temperatura es la variable más crítica a la hora de registrar los datos, se procede a construir las correlaciones necesarias por distintos tramos de temperatura.

Finalmente se establecen las conclusiones derivadas de estas gráficas, los procedimientos de actuación y el tratamiento de los datos en las situaciones en las que las condiciones climatológicas puedan afectar al anemómetro de cazoletas.



2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

2.2- Introducción a la instalación

La instalación que ha servido para recoger los datos analizados es una torre meteorológica de 30 m situada en el Parque Tecnológico Walqa, en Cuarte (Huesca). Fue instalada el 17 de marzo de 2008 en un terreno llano con césped que se encuentra a una elevación de 441 m y a su alrededor tiene diferentes edificios y otros obstáculos cercanos (se pueden consultar más detalles sobre la localización de la torre de medida en el anexo A.2).

En algunas ocasiones la torre puede llegar a distorsionar el flujo que está cercano a ella, por lo que para evitar este fenómeno de distorsión, se le añaden unos brazos que se proyectan horizontalmente para que los sensores que se montan encima de ellos estén fuera de la influencia de la estructura. Ha de comprobarse que estos brazos no se inclinan ni giran ya que este hecho podría alterar las mediciones. Por otra parte, como recomienda MEASNET (Measuring Network of Wind Energy Institutes), es muy importante instalar el sensor de manera que forme un ángulo de unos 45º respecto a la dirección principal del viento (la disposición de los brazos de la torre y los sensores instalados en ellos puede consultarse en el anexo A.2).

De todos los tipos de anemómetros que existen hoy en día, el más utilizado para las mediciones de la velocidad del viento en aerogeneradores es el **anemómetro de cazoletas**. Este tipo de sensores tienen la ventaja de no tener un precio muy elevado y ser robustos pero, por el contrario, tienen una serie de desventajas que conviene tener en cuenta.

En primer lugar, se hablará del par de fricción en el rodamiento que llevan incorporado. Para que este dispositivo tenga un correcto funcionamiento, es necesario que esté lubricado; por lo tanto, cabe esperar que la temperatura ambiente afecte a los datos que el anemómetro registre. Por otra parte, esta fricción hace que haya una velocidad umbral a partir de la cual el anemómetro no toma medidas puesto que no gira.

En segundo lugar han de considerarse los efectos dinámicos. Estos hacen que el anemómetro se acelere con mayor rapidez de lo que tarda en decelerarse, por lo que también puede dar lugar a fuente de errores en las medidas tomadas (efecto de sobrevelocidad).

Por último, hay que tener en cuenta las características de respuesta angular. Éstas aparecen cuando en el emplazamiento el aire sopla con una cierta inclinación y no de manera horizontal.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Todos estos errores en la medición de la velocidad afectan directamente a la estimación de la producción, debido a la relación lineal existente entre la potencia y el cubo de la velocidad.

Para observar estos defectos, se han tomado a su vez medidas con un **anemómetro ultrasónico**. Este tipo de anemómetros tienen mayor precisión que los de cazoletas aunque también son susceptibles de errores debido a que en condiciones climatológicas adversas (ambientes lluviosos, con niebla...) suelen tener problemas para medir la velocidad del viento, perdiendo así numerosos registros.

Los anemómetros sónicos tienen un coste más elevado que los de cazoletas, pero no necesitan mantenimiento mecánico ni posteriores calibraciones a la inicial. A pesar de ello, no existe todavía una confianza general en este tipo de sensores ya que su respuesta no está bien caracterizada y es altamente dependiente del diseño que se esté utilizando.

2.3- Sensores utilizados y variables medidas en el estudio

En nuestro estudio se han utilizado diez sensores para medir las diferentes variables: anemómetro principal, anemómetro de apoyo, anemómetro vertical, anemómetro ultrasónico, dos veletas, un termómetro, un piranómetro, un sensor de radiación neta y un barómetro.

Las variables medidas corresponden a las siguientes: temperatura, presión, dirección a dos alturas, velocidad vertical, velocidad a diferentes alturas con anemómetro sónico y de cazoletas, radiación solar y radiación neta.

A continuación se van a listar los sensores utilizados, sus características técnicas y su ubicación en la torre de medida:

- *Anemómetro principal:*

Es un anemómetro de cazoletas instalado en la torre de medición, a 30 m de altura. Se le llama principal porque, como ya se ha citado anteriormente, una de las finalidades de instalar este laboratorio de medición era medir la curva de potencia de un aerogenerador que estaba situado a su lado. La marca, modelo y resto de características técnicas venía definido por la norma que rige el tipo de anemómetros a instalar en este tipo de casos.

- *Anemómetro de apoyo*

Sus características son semejantes a las del principal. Sin embargo, este anemómetro de cazoletas se encuentra instalado a 28'5 m en la torre de medida. Su principal función es corroborar las medidas tomadas por el anemómetro principal.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



- *Veleta 1*

Consiste en un potenciómetro de $10\text{ k}\Omega$ situado a la misma altura que el anemómetro de apoyo, es decir, a $28'5\text{ m}$. Su función es determinar la dirección del viento para la futura ubicación del aerogenerador en la zona analizada.

Al decidir qué tipo de veleta se quiere implantar en la instalación, conviene destacar que la estabilidad de estos sensores aumenta con el peso.

- *Termómetro*

Está situado a $27'5\text{ m}$ sobre el terreno, registra la temperatura ambiente y sirve para determinar la densidad del aire del emplazamiento. Este es un dato muy relevante ya que, como se sabe, la energía del viento es directamente proporcional a la densidad del aire. Es importante colocar este sensor por lo menos a más de 10 m de altura, y evitar así la radiación emitida por el suelo.

- *Veleta 2*

Este sensor está formado por un potenciómetro de $10\text{ k}\Omega$ y se encuentra a 25 m de altura. Cumple la misma función que la veleta 1.

- *Anemómetro ultrasónico 3D*

Este tipo de anemómetro es más preciso que el de cazoletas y no requiere mantenimiento mecánico. Por otro lado, tiene la desventaja de que cuando las condiciones climatológicas no son las idóneas, se pueden perder registros, ya que tiene problemas para medir en este caso específico. Está situado a 25 m sobre el nivel del suelo. Con este sensor podemos medir diferentes variables, entre las que destacan: velocidad sónica, dirección ultrasónica y temperatura. Cabe mencionar que esta última variable no es una medida relevante en el estudio debido a que no está calibrada. Proporciona una medida que ayuda a corroborar que el valor de la velocidad medido es correcto.

- *Anemómetro vertical*

Es un anemómetro de hélice que se encuentra a 15 m de altura. Su función es la misma que la de los otros anemómetros, aunque en este caso la componente que se mide del viento es la vertical. Como se verá a lo largo de este proyecto, los datos proporcionados por este sensor no han sido determinantes a la hora de realizar el estudio, ya que la componente más relevante del viento a la hora de estimar la producción de energía es la horizontal, medida anteriormente por el resto de anemómetros.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



- *Piranómetro*

Es un instrumento que sirve para medir la radiación solar en una superficie plana o, lo que es lo mismo, es un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en un cuerpo de 180°. Está localizado a 3 m en la torre de medición.

- *Sensor de radiación neta*

Este sensor está situado a tan sólo 1,5 m de altura. Como su propio nombre indica, toma los datos referentes a la radiación neta de la implantación.

- *Barómetro*

Está situado también a 1,5 m en la torre meteorológica y se utiliza para tomar datos de la presión atmosférica.

- *Datalogger*

Es el dispositivo electrónico donde se almacenan todas las señales generadas por los distintos sensores utilizados en la instalación. En nuestro caso, el periodo definido para la toma de registros puntuales fue de 10 minutos. El datalogger es capaz de presentar la media, el valor máximo, el valor mínimo y la desviación estándar del periodo de registro establecido de cada una de las magnitudes medidas. En nuestra torre de medición este dispositivo se encontraba a 1'5 m de altura.

El resto de datos técnicos de cada uno de los sensores (tales como marca y modelo del sensor, número de serie, offset del sensor, dirección principal y orientación del brazo) pueden consultarse en el anexo A.2. En el mismo documento figura también un informe sobre la localización de la torre meteorológica, así como la vista general, tramo superior, tramo medio y tramo inferior de la misma.

Además de esto, si se consultan las variables medidas en el anexo A.3, se puede observar que durante un breve periodo (aproximadamente un mes) se midió la humedad relativa en la instalación. Esta variable tiene por objeto el cálculo preciso de la densidad del aire en el emplazamiento, factor que repercutiría sobre la producción del aerogenerador pero no sobre la velocidad medida. Por esta razón no se ha considerado relevante en el estudio de los datos. Habría que tenerla en cuenta cuando se quisiese valorar el peligro de heladas en el emplazamiento.



3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS.

3.1- Introducción

El primer paso para poder comenzar a analizar los datos recogidos en la estación meteorológica es descargarlos del datalogger. Como se sabe, este dispositivo es capaz de almacenar todas las señales generadas por los sensores en un periodo de toma de registros definido (en nuestro caso este periodo se fijó cada 10 minutos). Así mismo se almacenan cuatro valores de cada variable: la media, el valor máximo, el valor mínimo y la desviación estándar del periodo de registro establecido. Puede consultarse en el anexo A.3 'Muestra de los datos registrados' el formato de las tablas en los que se incluyen los registros proporcionados por los sensores. En las mismas se representan los datos de todas las variables medidas para el conjunto de datos de, aproximadamente, un día ya que debido a la cantidad de datos registrados es imposible adjuntarlos todos.

Hubo dos periodos de descarga de los datos: el primero contenía prácticamente al primer año (desde Abril del 2008 hasta Abril del 2009) y el segundo periodo comprendía desde Abril del 2009 hasta Abril del 2010. Es importante señalar que para poder analizar un emplazamiento correctamente es necesario realizar mediciones durante un periodo mínimo de un año. De esta manera, es fácil captar las variaciones estacionales.

3.2- Tratamiento y limpieza de los datos

Una vez obtenidos los datos de la torre meteorológica situada en Walqa, se procede a usar un programa informático de **rellenado** que se encarga de insertar el valor de -9999.99 en los datos que están vacíos.

Tras este paso comienza el filtrado de datos. Para que se vea claramente el proceso seguido se adjunta un esquema en el que figuran los dos métodos utilizados para llevar a cabo la limpieza:

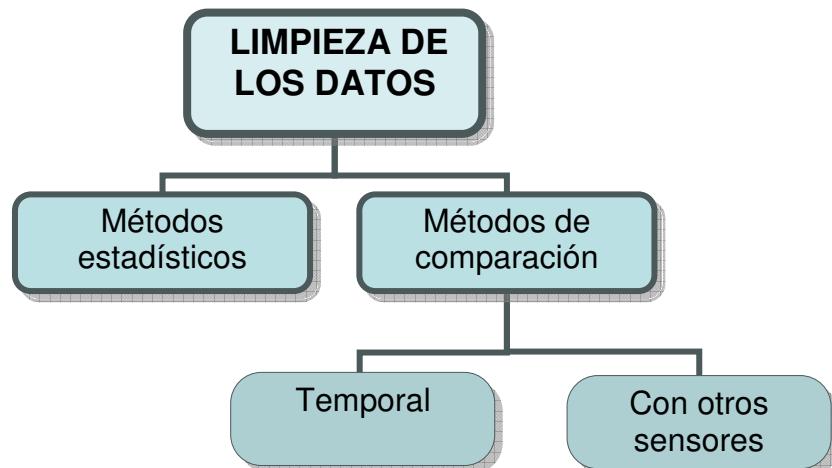


Figura 1. Esquema del proceso llevado a cabo en la limpieza de los datos.



Filtrado mediante técnicas estadísticas

El primero de los métodos aplicados consiste en el uso de técnicas estadísticas. Mediante esta primera técnica se estudian los intervalos generados al tomar tres veces el valor de la desviación típica (se suponen como los valores máximos dentro de una distribución normal) y se filtran los datos que no están dentro de los mismos. El error de tres sigma proporciona la curva estadística de una distribución normal para el 99.73 % de los datos, por lo que el error cometido sería de un 0.27 %. Además, con la ayuda de la desviación típica también se pueden filtrar los datos que tienen este valor mayor que la media en el periodo registrado, ya que esto es inviable.

Cabe mencionar que el filtrado llevado a cabo no ha sido la eliminación de los datos que eran incorrectos, sino que se ha sumado -1000 al valor dado por el sensor para que de esta forma no interfieran en los resultados y por si en algún momento es necesario volver a recuperarlos, se puedan localizar de una manera rápida y sencilla.

Filtrado mediante comparación de datos

La segunda vía de limpieza de datos se basa en métodos de comparación. Se comparan de dos maneras: de manera temporal (comprobando con los datos anteriores y posteriores que el registro sea aceptable) y con las medidas dadas por otros sensores. De esta manera se revisan minuciosamente todos los datos registrados, decidiendo los datos válidos para participar en el estudio y los que deben quedar al margen pudiendo ser recuperados más tarde. Este estudio se lleva a cabo para cada una de las variables, tanto la media, como los valores máximos y mínimos.

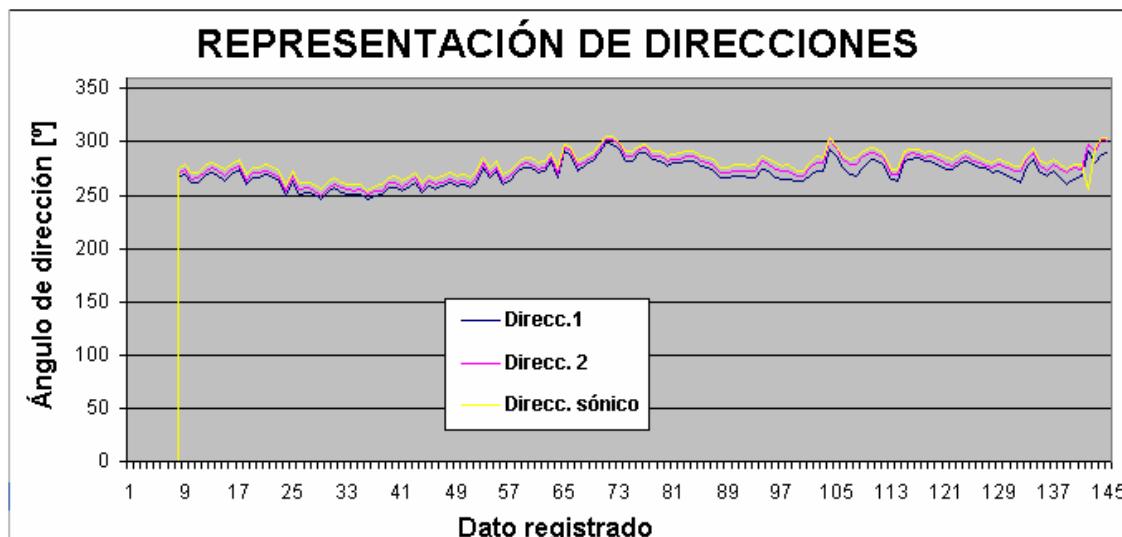
En este apartado se incluyen las comparaciones realizadas para las siguientes variables: **dirección, velocidad, temperatura, presión y radiación.**

Teniendo en cuenta la imposibilidad de adjuntar las gráficas con todos los datos representados debido a su volumen, se ha escogido una parte representativa de las mismas para cada variable. En las gráficas de dirección y velocidad se ha representado el conjunto de datos correspondiente a un día, que reúne un total de 144 datos, mientras que en las de presión, temperatura y radiación se muestra el periodo de una semana (aproximadamente 1010 datos) para poder apreciar, entre otras cosas, la transición día-noche.



- Dirección

Para las tres direcciones medidas se han representado un total de 144 datos correspondientes a los registros tomados durante un día en la instalación:



Gráfica 2. Representación de los valores dados por las veletas 1 y 2 y la medida tomada en la dirección ultrasónica para un día.

En la gráfica 2 se puede observar la comparación realizada entre los valores aportados por la veleta 1, la veleta 2 y los del sensor ultrasónico. Las medidas de las direcciones se realizan en un rango de 0° a 360° , correspondiendo la dirección Norte con los 360° .

Lo primero que puede deducirse de esta gráfica es que el sensor ultrasónico proporciona una mayor medida prácticamente para todos los registros del día señalado. Este hecho lleva a pensar que ese sensor tiene un offset.

Por otra parte se observa que a pesar de que la veleta 2 se encuentra ubicada prácticamente a la misma altura que el sensor ultrasónico y que la veleta 1 está en el mismo brazo que el anemómetro de apoyo, sus registros son bastante aproximados. Este hecho se debe a que la distancia entre las dos veletas es pequeña por lo que no permite que en el perfil de la velocidad del viento haya torsión.

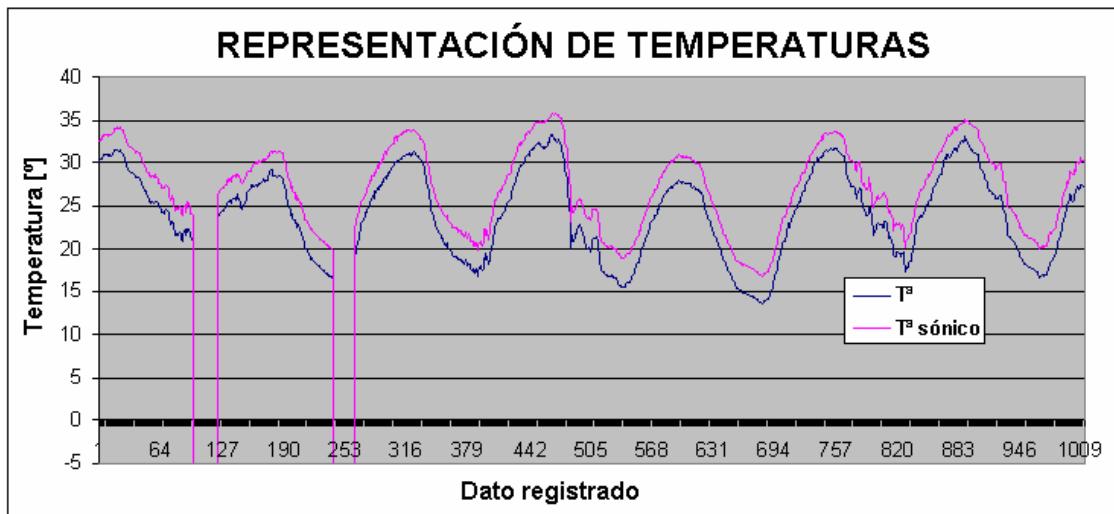
Al inicio de la gráfica 2 se observa una discontinuidad de datos, esto es debido a que esos datos tienen el valor de -9999.99 (proporcionados por el programa de relleno) por lo que no es posible observarlos en la escala aplicada. El resto de los valores correspondientes a ese día mantienen una dirección entre los 250° y los 300° .

Como comprobación adicional, puede evaluarse esta gráfica junto a la rosa de vientos que figura en el anexo A.7. En ella se muestra la frecuencia de aparición del viento según cada sector y se puede verificar que la dirección de predominancia del viento en este emplazamiento corresponde con los 270° .



- Temperatura

En la gráfica 3 se observa la comparación de algunos de los registros dados por el termómetro y por el sensor ultrasónico para el periodo de una semana.

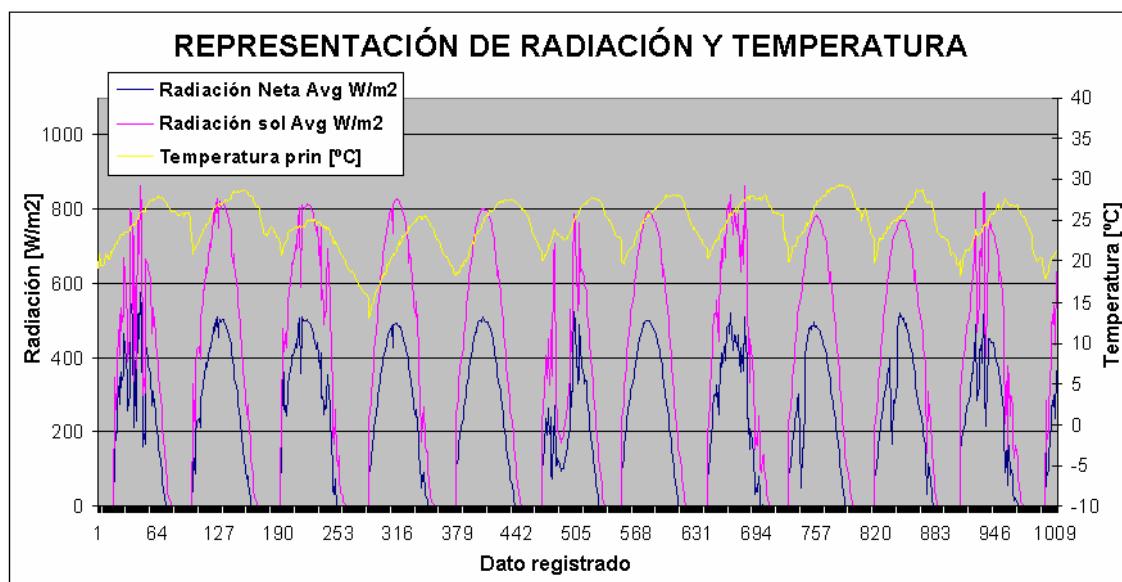


Gráfica 3. Representación de algunas de las temperaturas dadas por el termómetro y el sensor ultrasónico.

Si se observan los datos del inicio de la gráfica se observa que hay unas caídas bruscas de temperatura. Este hecho corresponde a que durante este periodo no se registró ningún valor de temperatura, por lo que corresponden a valores rellenos dados por el programa informático. El anemómetro ultrasónico utilizado también es capaz de medir valores de temperatura y, como ya se ha comprobado para las medidas de dirección dadas por este sensor, aquí también se obtienen mayores valores aunque como ya se ha indicado en el apartado 2.3, la temperatura ultrasónica no se considera representativa en este estudio. Por otra parte en la gráfica pueden apreciarse claramente los ciclos diarios de temperatura.

- Radiación y temperatura

En la gráfica 4 en la que se representan las radiaciones solar y neta dadas por el sensor de radiación junto a la temperatura dada por el termómetro, se verifica que ambas variables están íntimamente relacionadas. Cuando aumenta la radiación solar se produce un aumento de la temperatura ambiente.



Gráfica 4. Representación de los valores de radiación neta, solar y temperatura dados por los sensores para una semana.

El periodo escogido para ver la influencia de la radiación y la temperatura ha sido de una semana. Esto se ha hecho de esta manera para poder apreciar de forma más clara la transición noche-día. En la gráfica superior se aprecian los ciclos de variación de temperatura en los que durante el día va aumentando la radiación y, por consecuencia, la temperatura y por la noche hay un descenso de estas variables. Al igual que ocurría en la gráfica precedente se observan algunos registros en los que la radiación desciende bruscamente. Esto es debido a que corresponden con datos rellenos con el valor -9999.99 debido a su incorrecto registro en la instalación.

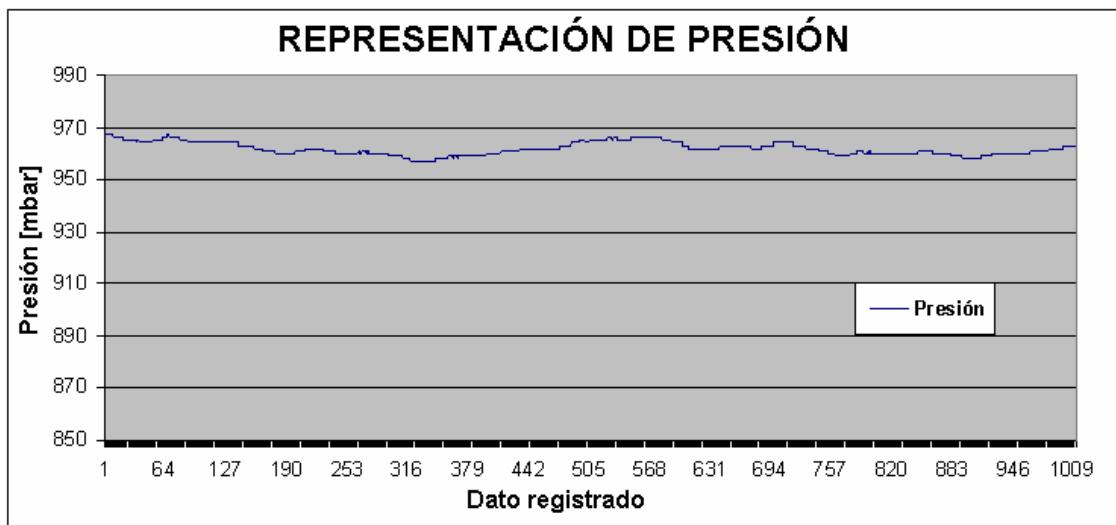
La cantidad de radiación solar recibida en un emplazamiento depende de la estación del año, de la hora del día y de la latitud a la que se encuentre el mismo. Todas estas diferencias de radiación son las que generan las variaciones de temperatura. Por otra parte, se sabe que la temperatura puede variar en función del tipo de superficie y de la altura a la que se estén realizando las mediciones.

Como se indica al principio del presente capítulo, en la torre meteorológica instalada en el Parque Tecnológico Walqa se midieron dos tipos de radiación: la radiación neta y la radiación solar. A la hora de realizar las gráficas para comprobar las relaciones entre las diferentes variables, únicamente se ha tenido en cuenta la influencia que la radiación solar pudiera tener. Esto se ha hecho así porque la radiación neta solar se define como la fracción de radiación solar menos el albedo (el albedo es la fracción de radiación solar reflejada por la superficie). Normalmente el valor del albedo puede estimarse ya que depende del tipo de superficie. En nuestro caso (al ser césped) podría tener un valor entre 0,20 y 0,25.



- Presión

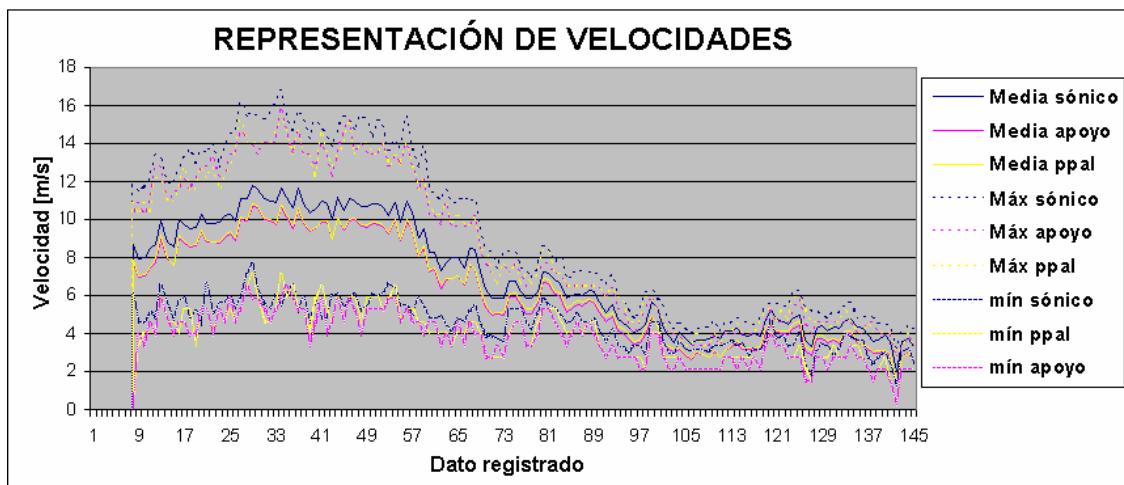
El periodo de representación escogido para ver la evolución de la presión en el emplazamiento ha sido de una semana. Como se aprecia en la gráfica 5 la presión suele ser prácticamente constante, se mantiene dentro de unos márgenes. De hecho, si se evalúa el conjunto de los datos estudiados puede decirse que todos los registros de presión se encuentran dentro del intervalo de 930 mbar a 980 mbar.



Gráfica 5. Representación de los valores de presión registrados por el barómetro durante una semana.

- Velocidad

En la gráfica 6 se muestran los registros dados por los anemómetros principal, ultrasónico y de apoyo para un día cualquiera de medición. En ella se realiza una comparación de los valores mínimos, máximos y medios dados por estos sensores para comprobar el correcto registro de los mismos.



Gráfica 6. Representación de los valores máximos, medios y mínimos dados por los anemómetros principal, de apoyo y ultrasónico para un día.

Tanto en las medidas de los valores máximos, mínimos así como la media del periodo se observa una vez más que el sensor sónico da un mayor valor. El anemómetro de apoyo proporciona prácticamente los mismos registros que el principal si bien en algunas ocasiones sus valores son un poco menores. Por otra parte se aprecia claramente al inicio de la gráfica una serie de datos en los que los valores se sitúan por debajo de cero. Estos corresponden a datos rellenos con el valor -9999.99 ya que no habrían sido registrados correctamente en la torre de medida.

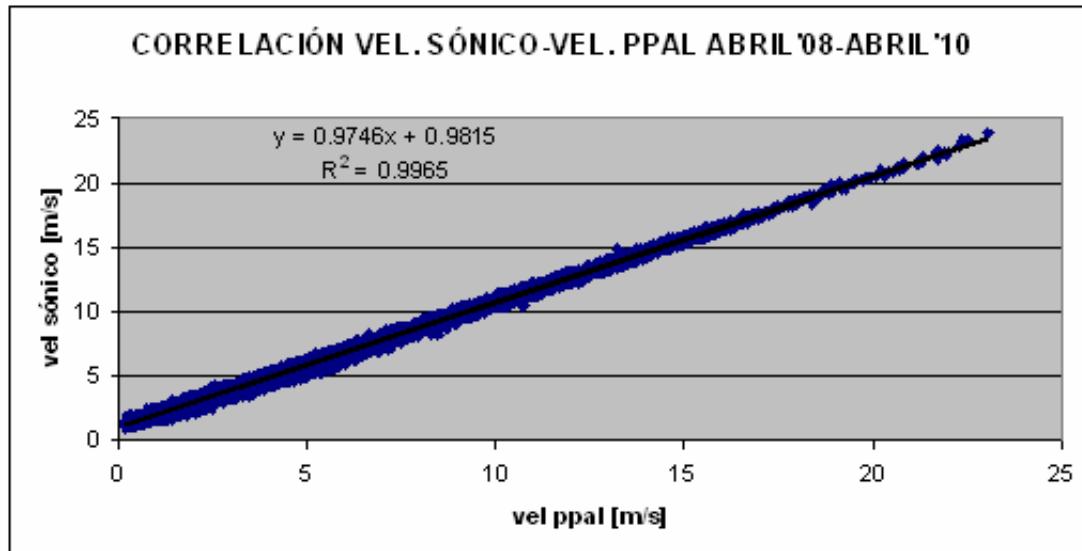
3.3 Estudio de la relación entre las velocidades

Una vez filtrados los datos, se estudian las relaciones de las velocidades entre los registros del anemómetro sónico, el de apoyo y el principal. Para ello se estudia la correlación lineal que presentan los datos de cada uno de los anemómetros con los del principal. Se evalúan por tanto dos correlaciones: una que representa la velocidad principal frente a la velocidad de apoyo y, la segunda que muestra la velocidad principal frente a velocidad ultrasónica. Sabemos que estos sensores han de registrar aproximadamente las mismas medidas por lo que la correlación generada por ellos será una recta de pendiente cercana a los 45°.

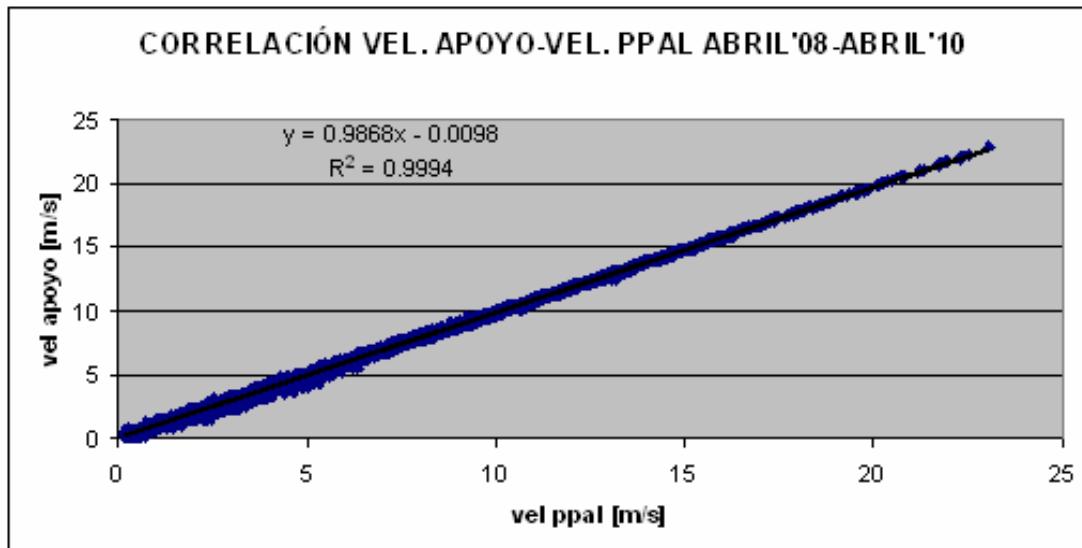
Las correlaciones obtenidas entre la velocidad principal y las velocidades sónica y de apoyo son las siguientes:



Estudio de la influencia de la temperatura
y otros parámetros en la medición
de la velocidad del viento



Gráfica 7. Velocidad principal frente a la velocidad ultrasónica.



Gráfica 8. Velocidad principal frente a la velocidad de apoyo.

En ambas gráficas se verifica la relación lineal existente entre los sensores de velocidad principal, de apoyo y ultrasónica. Además, al igual que ha sucedido en el filtrado de datos mediante comparación, aquí se observa que el sensor de velocidad ultrasónica proporciona siempre un valor de velocidad más elevado que los otros dos anemómetros de cazoletas. Este hecho se observa claramente en la ecuación de las correlaciones: el término correspondiente a la ordenada en el origen de la gráfica que representa a la velocidad sónica es mayor al que representa la velocidad de apoyo.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Ecuación Vel. Sónico – Principal: $y = 0.9746x + 0.9815$
 $R^2 = 0.9965$

Ecuación Vel. Apoyo – Principal: $y = 0.9868x - 0.0098$
 $R^2 = 0.9994$

Por esta razón junto a las obtenidas en las comparaciones, puede confirmarse que el anemómetro sónico posee un ligero offset respecto al principal.

Además el coeficiente de determinación R^2 indica que la recta definida para la ecuación de la gráfica de la velocidad de apoyo es más fiable que la de la velocidad sónica puesto que está más cercano a la unidad.

Por otra parte, en ambas gráficas se identifica la gran concentración de datos que hay hasta aproximadamente los 15 m/s de la velocidad principal. A partir de este valor, ambas rectas empiezan a hacerse más finas debido a que apenas se poseen registros en la instalación para valores elevados de velocidad del viento.

En resumen, la conclusión que se obtiene del estudio de la relación existente entre las velocidades es que todas ellas tienen un comportamiento similar y también que la velocidad sónica tiene un offset. Además de esto, se observa una mayor dispersión de los datos a bajas velocidades.

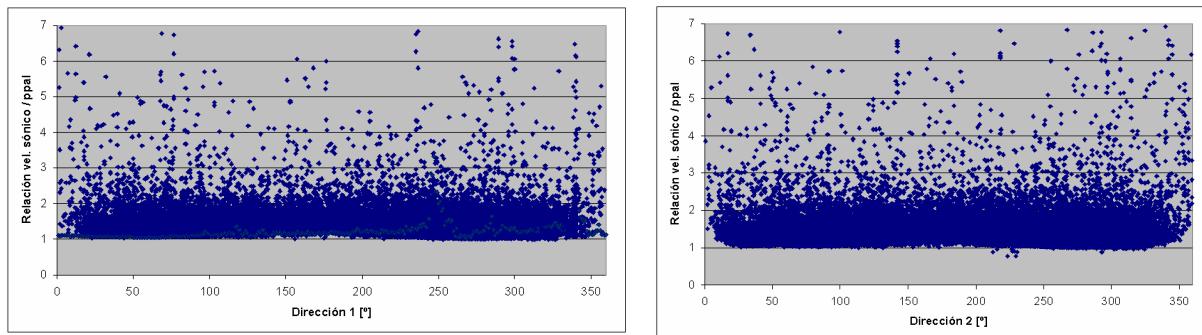
Comportamiento de la relación entre velocidades frente al resto de variables

Para continuar el estudio se comprueba de qué manera afecta cada variable a la relación existente entre la velocidad sónica y la velocidad principal. Esta relación (que en teoría debería ser unitaria) ayudará a observar la influencia que las diferentes variables (temperatura, presión, dirección 1, dirección 2 y radiación solar) ejercen sobre ella. De esta manera se podrá determinar las variables en las que conviene centrar el estudio. Las gráficas que contienen las representaciones de los datos en mayor tamaño pueden consultarse en el anexo A.4 ‘Gráficas sobre las relaciones entre las diferentes variables’. Como ya se ha comentado anteriormente no se va a comprobar la influencia de la radiación neta sobre esta relación.

En lo que respecta a las variables de las **direcciones** 1 y 2 (gráficas 9 y 10) no puede decirse que afecten de manera significante a la relación de velocidades. La gran mayoría de los datos se concentran en el rango de esta relación comprendido entre 1 y 2. Se observa que a cualquier ángulo de dirección registrada hay dispersión en los datos por lo que en términos de influencia sobre el anemómetro de cazoletas no es determinante.

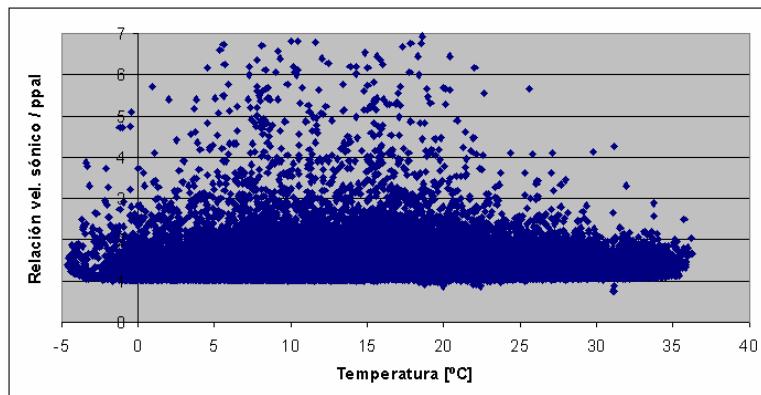


Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Gráficas 9 y 10. Representación de las direcciones 1 y 2 frente a la relación de la velocidad sónica entre la principal

Observando ahora la gráfica 11, referida a la **temperatura**, se observa una influencia más notable reflejándose en que la dispersión en los datos está concentrada en un tramo determinado de temperaturas. Cuando la temperatura ambiente es menor de unos 20 °C, los valores de velocidad principal y velocidad sónica medidos varían notablemente. Esto tendría su explicación en que la temperatura afecta de manera más severa a los anemómetros de cazoletas que a los ultrasónicos debido al lubricante que los primeros llevan incorporado en el rodamiento.



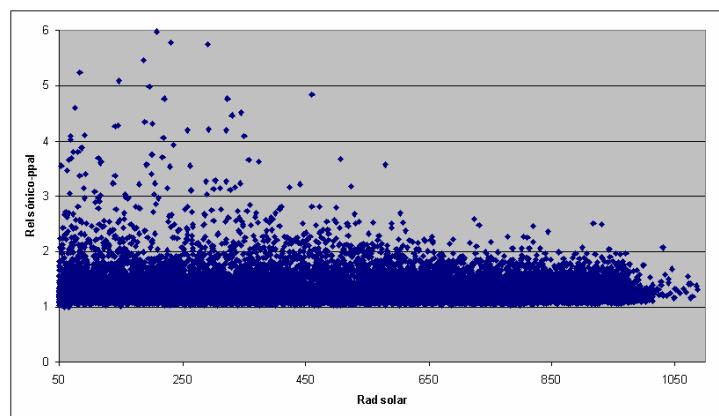
Gráfica 11. Representación de la temperatura frente a la relación de la velocidad sónica entre la principal

Respecto a la gráfica que hace referencia a la **radiación solar**, se puede observar que esta variable también influye en la relación de velocidades. Este hecho no debería sorprender ya que la radiación solar está íntimamente relacionada con la temperatura ambiente. De tal manera que un aumento en la intensidad de radiación solar suele coincidir con el aumento de la temperatura ambiente.

Por otra parte cabe mencionar que los valores de radiación solar por debajo de 50 W/m² no se han de tener en cuenta por lo que los datos menores a ese valor de referencia no se consideran fiables. Como ocurre con la temperatura, se aprecia que para valores bajos de radiación solar (menos de 650 W/m²) hay bastante dispersión en los datos.



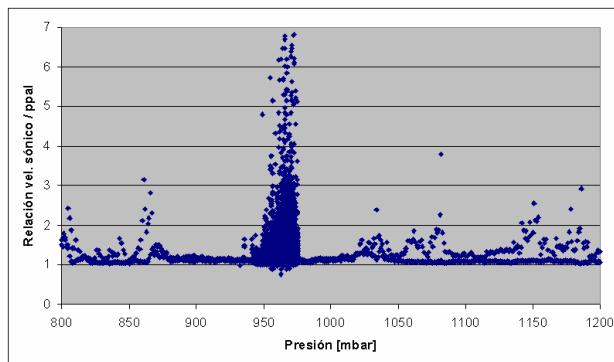
Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Gráfica 12. Representación de la radiación [W/m^2] frente a la relación de la velocidad sónica entre la principal

En cuanto a la **presión**, reflejada en la gráfica 13, puede decirse que no tiene un peso relevante a la hora de determinar la relación entre ambas velocidades. La mayoría de los valores registrados están en el rango de 925 mbar y 975 mbar, valores habituales en la zona donde se tomaron las medidas. Observando la gráfica se aprecia una acumulación de registros entorno al valor más frecuente en el emplazamiento.

Al ser el gradiente de presión tan pequeño se puede concluir que esta variable no afectaría a la relación entre velocidades.



Gráfica 13. Representación de la presión frente a la relación de la velocidad sónica entre la principal

Tras evaluar cada una de las diferentes gráficas, se puede concluir que las **variables que más influyen** en esta relación entre la velocidad sónica y la principal son **la radiación solar y la temperatura**. Al estar estrechamente relacionadas, el estudio se centrará simplemente en una de ellas: la temperatura, al considerar esta variable como la que más puede influir en los anemómetros a la hora de la medición de la velocidad del viento.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Si se quiere observar de una manera más detallada las rosas de viento de la instalación, las funciones de distribución de las velocidades así como las de las temperaturas y la evolución de los datos (respecto a velocidad, temperatura y radiación) para todo el periodo de tiempo en el que se registraron datos en la torre de medida, puede acudirse al anexo A.7 en el que se hace un resumen de todos los datos mostrados en el análisis.



4.- ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DE TURBULENCIA

Como ya se ha comentado en esta memoria, la intensidad de turbulencia (IT) es un parámetro básico a la hora de definir un aerogenerador. De hecho, normalmente a la hora de definir una clase de aerogenerador hay que tener en cuenta los dos parámetros estudiados en este proyecto: velocidad del viento y turbulencia. De ésta última dependen, entre otras cosas, la vida útil del aerogenerador que se instale en el parque eólico ya que si la intensidad de turbulencia es muy elevada se pueden producir desgastes por fatiga.

Para evitar que se produzcan estos desgastes se han establecido unos umbrales de referencia para la IT. Estos vienen definidos por la Norma Internacional IEC 61400-1:2005 (versión española UNE EN 61400-1:2006) de manera que se eviten instalaciones que puedan llevar asociado algún tipo de riesgo. Así, esta norma define varias clases y subclases de aerogeneradores tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Clases de aerogeneradores	I	II	III	S	
V_{med}	10 m/s	8,5 m/s	7,5 m/s	Valores definidos por el fabricante	
V_{ref}	50 m/s	42,5 m/s	37,5 m/s		
A IT_{ref}	0,16				
B IT_{ref}	0,14				
C IT_{ref}	0,12				

Tabla 14. Parámetros básicos para definir las clases de aerogeneradores

Las clases de aerogeneradores están diferenciadas según su velocidad (I, II, III) y según su turbulencia media anual para velocidades del viento de 15 m/s (A, B, C).

La intensidad de turbulencia suele definirse como la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad media del mismo, en tanto por ciento. Dado que normalmente los registros en los emplazamientos suelen tomarse cada diez minutos se define la intensidad de turbulencia diez-minutal, esto es:

$$IT_{10\text{ min}} = \frac{\sigma_{10\text{ min}}}{V_{10\text{ min}}}$$

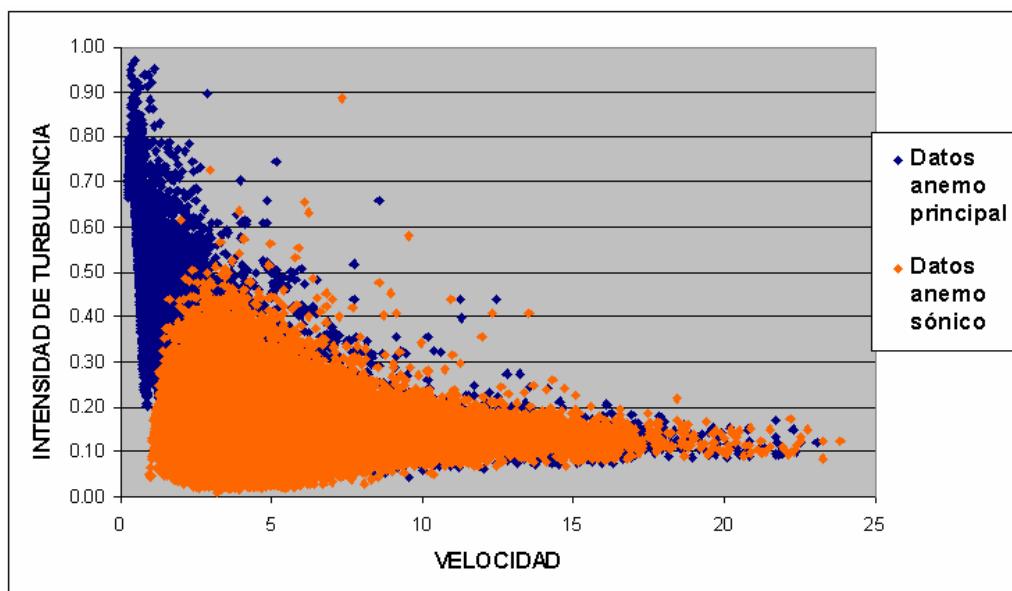
De esta fórmula se deduce que la dependencia de esta variable con la velocidad es muy directa (a velocidades de viento pequeñas suelen asociarse desviaciones estándar mayores).



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



En nuestro estudio se han obtenido tres intensidades de turbulencia: una para la relacionada con la velocidad sónica, otra para la velocidad principal y la última, la referida a la velocidad de apoyo. En este apartado se incluye la gráfica que compara la intensidad de turbulencia principal y la sónica (la que se refiere a la velocidad de apoyo es muy similar a la de turbulencia principal) para poder, de esta manera, apreciar las diferencias de una manera más clara. Para ver de una manera más ampliada las gráficas respecto a cada una de las velocidades puede consultarse el anexo A.5.



Gráfica 15. Intensidad de turbulencia respecto a la velocidad principal y respecto a la velocidad sónica [m/s].

Como puede observarse en la gráfica 15 en el caso del anemómetro principal, hay una elevada intensidad de turbulencia para velocidades menores a 3 m/s (caso que podría corresponderse con el momento de arranque del aerogenerador). Este valor supera el 80 % para velocidades menores de 2,5 m/s. Sin embargo en el caso del anemómetro sónico esto no es así. Generalmente puede verificarse que para velocidades menores de 3 m/s el máximo valor no supera el 50 % de intensidad de turbulencia.

Esta IT está muy relacionada con la curva de potencia del aerogenerador, ya que ésta última se basa en medidas tomadas para bajas intensidades de turbulencia. Las curvas de potencia representan la potencia eléctrica que el aerogenerador es capaz de generar para cada velocidad del viento.

Teniendo en cuenta que la velocidad del viento de arranque de la mayoría de los aerogeneradores suele estar comprendida entre los 3 m/s y los 4 m/s y la parada de los mismos se realiza para una velocidad del viento sobre los 20 m/s o 25 m/s, esto nos deja un rango de funcionamiento comprendido entre los 4 m/s y los 15-18 m/s.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Entonces, si se comparan las gráficas de IT obtenidas para nuestro emplazamiento con la curva de potencia de un aerogenerador (de 600 KW, en este caso) se obtiene lo siguiente:

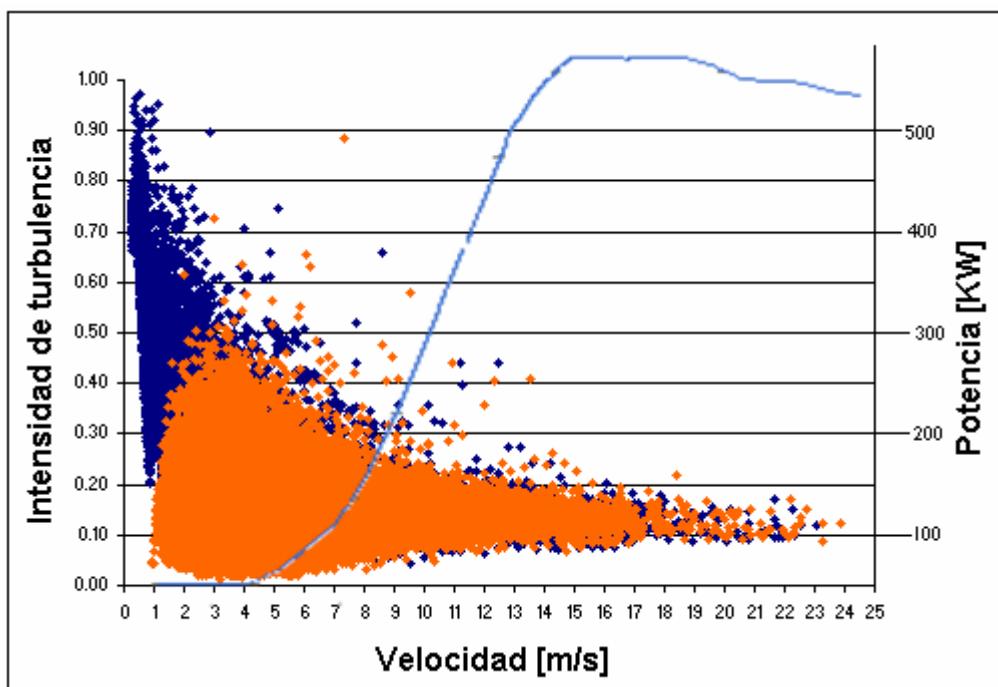


Gráfico 16. IT frente a la curva de potencia de un aerogenerador de 600 KW.

En la gráfica superior puede observarse que para velocidades de viento bajas (menores de 4 m/s) el aerogenerador no proporciona ninguna potencia, por lo tanto el hecho de que el anemómetro de cazoletas se vea más afectado a estas velocidades que el anemómetro sónico, no afectaría a la producción.

A partir de la velocidad de arranque del viento (unos 4 m/s) ambas intensidades de turbulencia se aproximan, por lo que tampoco afectaría a la producción el hecho de que se tomen medidas con un anemómetro u otro.

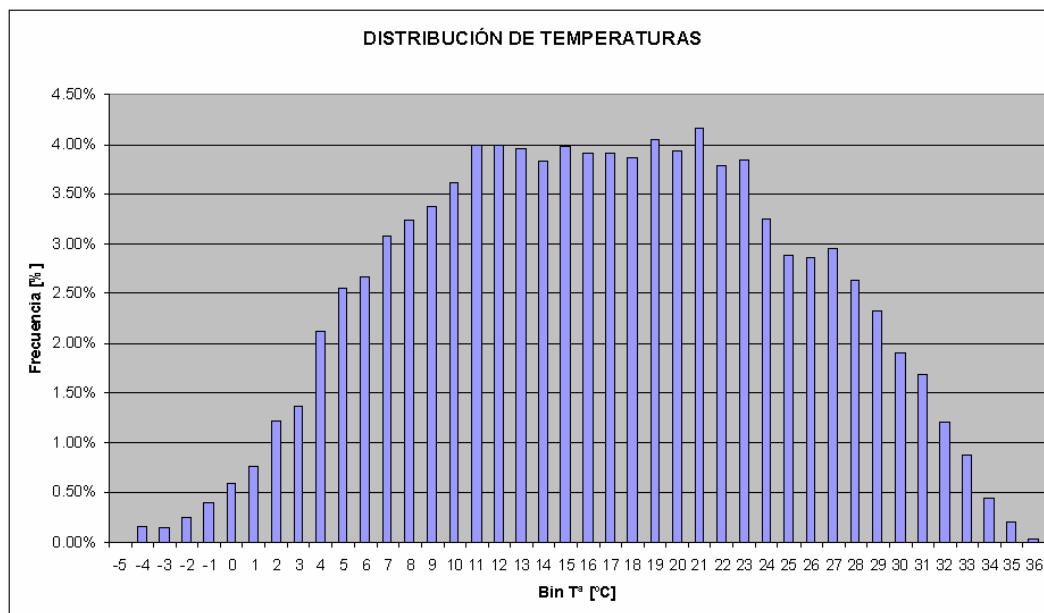


5.- ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

5.1- Determinación de los tramos de temperatura a estudiar

Una vez determinado que la variable en la que se va a centrar el estudio es la temperatura, se evalúa la influencia que esta variable tiene sobre la velocidad.

Para ello, como primer paso se procede a determinar el número de registros referidos a esta variable. Esto se hace mediante una tabla dinámica en la que se contabilizan un total de **63932** registros de temperatura. La idea es dividir estos registros en tres tramos de temperatura siguiendo criterios de discretización. De esta manera se podrán establecer tres tipos de rectas de correlación entre las velocidades principal y sónica (una para cada tramo de temperaturas). Para ello, se representa el histograma de frecuencias de la temperatura:



Gráfica 17. Frecuencia de los registros de temperatura.

Se ha llamado ‘bines de temperatura’ a los valores discretizados de esa variable.

Como puede observarse, se obtiene una distribución de tipo normal. Si se calcula la media de esta distribución se obtiene un valor de 16,71 °C y la desviación típica (sigma) corresponde a 8,273 °C.

Así mismo se determina que el 80% de los valores de temperatura del emplazamiento están entre 8 °C y 25 °C. La temperatura más frecuente en el emplazamiento coincide con los 21 °C con un porcentaje del 4,16%.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Tras analizar el histograma de frecuencias se establecen los rangos de temperatura a estudiar. Se van a realizar dos análisis: el primero se ha establecido para tener una distribución de datos equitativa (para que se tenga en cada uno de los tramos indicados un 33% de datos), dejando unos tramos de temperatura como siguen:

- Primer tramo: datos con temperaturas menores de 12 °C
- Segundo tramo: datos con temperaturas comprendidas entre 12 °C y 21 °C
- Tercer tramo: datos con temperaturas superiores a 21 °C

El segundo análisis viene definido atendiendo a criterios estadísticos (μ, σ) y a criterios físicos: bajas, medias y altas temperaturas. Por lo que los tramos son los siguientes:

- Primer tramo: datos con temperaturas menores de 8,5 °C (corresponde al 10% de los datos)
- Segundo tramo: datos con temperaturas comprendidas entre 8,5 °C y 25 °C (congrega el 80% de los datos)
- Tercer tramo: datos con temperaturas superiores a 25 °C (contiene el 10% de datos restantes)

A continuación se muestra un esquema del proceso que se va a llevar a cabo:

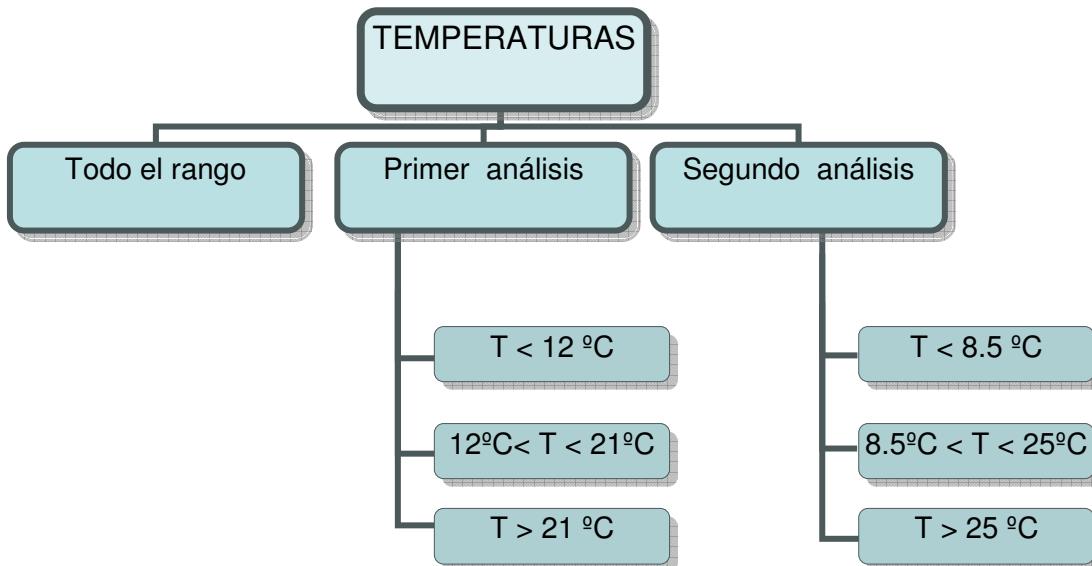


Figura 18. Esquema de los tramos de temperaturas.



5.2- Variación de velocidades en función de la temperatura

Una vez definidos los rangos de temperatura a estudiar, se procederá de la siguiente manera para cada uno de ellos: se determinarán los bins de velocidad (es decir, se discretizarán los registros de velocidad) y se calculará el promedio, la desviación estándar y el número de datos registrados para cada uno de estos bins, tanto como para los valores dados por el anemómetro sónico como para los del anemómetro principal.

Además, se ha determinado la ecuación de la línea de tendencia que relaciona la velocidad sónica con la principal tanto para todo el rango de temperaturas como para cada uno de los tramos establecidos. De esta manera cuando se recojan datos referidos a cualquiera de esas temperaturas se dispondrá de una aproximación lineal para aplicar.

- ESTUDIO DE TODO EL RANGO DE TEMPERATURAS

La ecuación válida para **todas las temperaturas** recogidas en el emplazamiento ha sido hallada previamente en el apartado 3.3 ‘Estudio de las relación entre las velocidades’. La ecuación obtenida de la correlación entre la velocidad sónica y la velocidad principal quedaba de la siguiente manera:

$$y = 0.9746x + 0.9815$$
$$R^2 = 0.9965$$

Donde la ‘y’ corresponde con la velocidad sónica y la ‘x’ con la velocidad principal.

Para ver más claramente la influencia de cada una de las velocidades se han discretizado los registros de velocidades. De esta manera se aprecian mejor las diferencias que existen entre los registros dados por el sensor sónico y los proporcionados por el principal.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Bin de Velocidad	Promedio de Vel. Principal	Desv. típica de Vel. Principal	Porcentaje de bin respecto al total de datos	Promedio de Vel. Sónica	Desv. típica de Vel. Sónica
0	0.35	0.098	0.87%	1.40	0.167
1	1.10	0.263	9.52%	2.07	0.287
2	2.01	0.284	15.88%	2.95	0.325
3	2.99	0.289	16.00%	3.91	0.326
4	3.99	0.286	13.83%	4.87	0.332
5	4.98	0.289	11.10%	5.82	0.350
6	5.98	0.284	9.41%	6.82	0.350
7	6.97	0.289	6.95%	7.80	0.351
8	7.97	0.290	4.66%	8.79	0.346
9	8.97	0.285	3.51%	9.75	0.343
10	9.98	0.283	2.82%	10.75	0.327
11	10.95	0.282	1.98%	11.66	0.322
12	11.94	0.281	1.24%	12.60	0.325
13	12.98	0.284	0.88%	13.61	0.334
14	13.95	0.295	0.59%	14.54	0.364
15	14.93	0.294	0.36%	15.50	0.310
16	15.92	0.260	0.21%	16.42	0.272
17	16.92	0.301	0.08%	17.36	0.478
18	17.95	0.251	0.04%	18.54	0.288
19	19.01	0.315	0.02%	19.58	0.353
20	19.91	0.325	0.02%	20.44	0.267
21	20.94	0.248	0.01%	21.42	0.266
22	21.90	0.242	0.02%	22.43	0.365
23	22.80	0.375	0.00%	23.56	0.410

Tabla 19. Datos referentes a la velocidad principal y sónica [m/s] para todas las temperaturas.

En la tabla 19 se comprueba que la mayor cantidad de datos registrados pertenecen al intervalo de velocidades bajas (entre 0 m/s y 8 m/s). En este rango de velocidades se encuentran concentrados casi el 90 % de todas las velocidades recogidas. No deja de llamar la atención el valor tan bajo de velocidad que es habitual para el emplazamiento que se está estudiando ya que se sabe que la velocidad de arranque de un aerogenerador suele estar entre los 3 y los 4 m/s. Por otro lado se pueden apreciar algunas rachas fuertes de viento que son aisladas ya que el número de veces que se producen durante el tiempo que duró la medición es despreciable (velocidades por encima de 23 m/s).

Respecto a los promedios calculados podemos comprobar lo que se había detectado ya anteriormente: el anemómetro ultrasónico proporciona siempre una medida más elevada de la velocidad que el anemómetro principal. Si tomamos por ejemplo el bin de velocidad correspondiente a 10 m/s, vemos que el promedio de la velocidad principal tiene un valor de 9,98 m/s mientras que el promedio de la velocidad sónica es de 10,746 m/s. Además si se compara a desviación típica de ambos anemómetros se comprueba que en el caso del anemómetro sónico es mayor para todo el intervalo de temperaturas.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



- ESTUDIO PARA TEMPERATURAS MENORES DE 12°C

En este caso la ecuación obtenida para el rango de **temperaturas menores a 12 °C** ha sido:

$$Vsónica = 0,975005 \cdot Vprincipal + 0,99767$$

con un valor de **R² = 0.99767**

Bin de Velocidad	Promedio de Vel. Principal	Desv. típica de Vel. Principal	Porcentaje de bin respecto al total de	Promedio de Vel. Sónica	Desv. típica de Vel. Sónica
0	0.35	0.100	1.49%	1.35	0.162
1	1.07	0.271	12.99%	1.99	0.286
2	1.98	0.282	16.23%	2.84	0.312
3	2.99	0.287	14.07%	3.80	0.316
4	3.98	0.286	11.36%	4.74	0.323
5	4.96	0.292	8.56%	5.69	0.334
6	5.99	0.285	6.60%	6.69	0.336
7	7.00	0.286	5.97%	7.70	0.344
8	7.98	0.290	5.06%	8.69	0.343
9	8.97	0.282	4.42%	9.67	0.329
10	10.00	0.282	3.99%	10.68	0.319
11	10.95	0.282	3.25%	11.60	0.309
12	11.95	0.283	1.98%	12.56	0.331
13	12.97	0.281	1.57%	13.58	0.325
14	13.95	0.294	1.11%	14.55	0.330
15	14.94	0.304	0.59%	15.51	0.326
16	15.90	0.259	0.34%	16.37	0.252
17	16.84	0.280	0.16%	17.30	0.333
18	17.92	0.239	0.04%	18.53	0.322
19	19.01	0.309	0.06%	19.53	0.346
20	19.92	0.373	0.05%	20.44	0.304
21	21.00	0.265	0.03%	21.46	0.300
22	21.93	0.233	0.03%	22.54	0.368
23	22.80	0.375	0.01%	23.56	0.410

Tabla 20. Datos referentes a la velocidad principal y sónica [m/s] para temperaturas menores de 12°C.

Para este rango de temperaturas se cuenta con un total de 20201 datos registrados. En la tabla 20 se puede ver que, como ocurre con el intervalo anterior de temperaturas, cerca del 90 % de estos datos se concentran en el rango de velocidades que va de 0 m/s a 9 m/s y que a partir de 18 m/s hay muy poca cantidad de datos en cada bin. De hecho no se deberían tener en cuenta los valores de velocidad por encima de 21 m/s debido a que podrían dar lugar a errores por su escasa frecuencia de aparición en el registro. Nuevamente se confirma la sobreestimación por parte del anemómetro sónico y se verifica el mayor valor de su desviación estándar respecto a la de la velocidad principal.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



- ESTUDIO PARA TEMPERATURAS ENTRE 12°C Y 21 °C

En este caso la recta de correlación obtenida para el rango **de temperaturas menores a 12 °C** ha sido:

$$Vsónica = 0,973526 \cdot Vprincipal + 0,99308$$

con un valor de **R² = 0.99659**

Bin de Velocidad	Promedio de Vel. Principal	Desv. típica de Vel. Principal	Porcentaje de bin respecto al total de datos	Promedio de Vel. Sónica	Desv. típica de Vel. Sónica
0	0.35	0.097	0.97%	1.44	0.154
1	1.11	0.258	10.46%	2.10	0.276
2	1.99	0.286	16.40%	2.94	0.318
3	2.98	0.290	15.88%	3.89	0.321
4	3.99	0.283	13.55%	4.85	0.326
5	4.98	0.288	10.68%	5.80	0.349
6	5.97	0.288	9.35%	6.80	0.343
7	6.97	0.289	7.09%	7.78	0.338
8	7.96	0.291	4.23%	8.75	0.342
9	8.97	0.284	3.34%	9.76	0.329
10	9.96	0.286	2.77%	10.76	0.325
11	10.96	0.285	1.67%	11.71	0.324
12	11.91	0.282	1.23%	12.62	0.320
13	13.00	0.289	0.91%	13.64	0.347
14	13.97	0.292	0.56%	14.58	0.336
15	14.92	0.273	0.45%	15.46	0.281
16	15.95	0.259	0.26%	16.48	0.278
17	17.10	0.270	0.08%	17.48	0.670
18	17.97	0.264	0.07%	18.54	0.278
19	19.02	0.412	0.01%	19.78	0.371
20	19.88	0.163	0.02%	20.45	0.156
21	20.77	0.042	0.01%	21.30	0.049
22	21.91	0.316	0.01%	22.29	0.412

Tabla 21. Datos referentes a la velocidad principal y sónica [m/s] para temperaturas mayores de 12°C y menores de 21°C.

Si en el tramo precedente los registros a partir de 23 m/s tenían poca frecuencia de aparición, en este tramo los datos empiezan a tener poca significancia para velocidades mayores a 22 m/s. Los registros de 19 m/s en adelante son muy escasos en comparación con otras velocidades. Para este rango de temperaturas también se cumple que la mayoría de datos pertenecen al intervalo de velocidades bajas (es decir, de 0 m/s hasta los 8 m/s). Por otro lado cabe decir que este es el tramo con mayor concentración de datos respecto al total.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



- ESTUDIO PARA TEMPERATURAS MAYORES DE 21 °C

La ecuación obtenida para el rango de **temperaturas mayores de 21 °C** ha sido:

$$V_{sónica} = 0,98318 \cdot V_{principal} + 1,04457$$

con un valor de **R² = 0.995509**

Bin de Velocidad	Promedio de Vel. Principal	Desv. típica de Vel. Principal	Porcentaje de bin respecto al total de datos	Promedio de Vel. Sónica	Desv. típica de Vel. Sónica
0	0.38	0.079	0.17%	1.50	0.155
1	1.16	0.243	5.18%	2.18	0.259
2	2.05	0.279	14.98%	3.06	0.306
3	3.00	0.289	17.98%	4.01	0.309
4	4.00	0.288	16.51%	4.96	0.314
5	4.98	0.288	13.99%	5.92	0.330
6	5.98	0.281	12.17%	6.92	0.336
7	6.95	0.290	7.73%	7.90	0.342
8	7.96	0.287	4.75%	8.91	0.313
9	8.95	0.291	2.80%	9.87	0.343
10	9.96	0.279	1.73%	10.88	0.305
11	10.92	0.275	1.09%	11.78	0.310
12	11.94	0.271	0.53%	12.70	0.291
13	13.02	0.293	0.18%	13.70	0.312
14	13.80	0.284	0.13%	14.19	0.552
15	14.99	0.398	0.05%	15.74	0.305
16	15.92	0.283	0.02%	16.53	0.344
17	16.64	0.120	0.01%	17.27	0.290
22	21.68	--	0.00%	22.20	--

Tabla 22. Datos referentes a la velocidad principal y sónica [m/s] para temperaturas mayores de 21°C.

En la tabla 22 se aprecia la disminución de bins de velocidad conforme aumenta la temperatura ambiente. Para este rango de temperaturas podría decirse que a partir de 16 m/s los datos registrados son muy poco significativos. Al igual que pasaba en las dos gráficas precedentes el rango de velocidades que contiene más del 90 % de los datos va de 0 m/s hasta los 8 m/s.

A continuación se va a realizar el mismo estudio pero para el rango definido por el segundo análisis, es decir, temperaturas menores de 8,5°C, temperaturas entre 8,5 y 25°C y temperaturas mayores de 25 °C.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



- ESTUDIO PARA TEMPERATURAS MENORES DE 8,5°C

En este caso la ecuación obtenida para el rango de **temperaturas menores a 8,5 °C** ha sido:

$$V_{sónica} = 0,9755 \cdot V_{principal} + 0,8777$$

con un valor de **R² = 0.997665**

Bin de Velocidad	Promedio de Vel. Principal	Desv. típica de Vel. Principal	Porcentaje de bin respecto al total de datos	Promedio de Vel. Sónica	Desv. típica de Vel. Sónica
0	0.35	0.099	1.80%	1.34	0.162
1	1.07	0.270	14.59%	1.98	0.288
2	1.97	0.281	17.31%	2.82	0.305
3	2.98	0.284	14.20%	3.77	0.310
4	3.98	0.288	10.79%	4.72	0.321
5	4.95	0.292	7.69%	5.64	0.329
6	5.97	0.283	5.65%	6.63	0.323
7	7.00	0.296	5.55%	7.67	0.351
8	7.99	0.287	4.96%	8.67	0.345
9	8.96	0.282	4.59%	9.63	0.325
10	10.00	0.282	4.18%	10.66	0.320
11	10.96	0.286	3.23%	11.59	0.319
12	11.95	0.282	1.88%	12.56	0.343
13	13.00	0.286	1.41%	13.64	0.338
14	13.93	0.293	1.06%	14.55	0.337
15	14.99	0.325	0.51%	15.57	0.333
16	15.81	0.247	0.30%	16.31	0.271
17	16.89	0.221	0.13%	17.37	0.295
18	17.87	0.239	0.04%	18.59	0.333
19	18.92	0.202	0.03%	19.70	0.295
20	19.78	0.305	0.03%	20.42	0.311
21	21.04	0.382	0.02%	21.74	0.318
22	21.93	0.367	0.03%	22.77	0.424
23	22.80	0.375	0.02%	23.56	0.410

Tabla 23. Datos referentes a la velocidad principal y sónica [m/s] para temperaturas menores de 8,5 °C.

En este caso casi el 90 % de los datos de velocidad corresponden a bins entre 1 m/s y 10 m/s. En este tramo de temperaturas empiezan a ser escasos en la instalación los datos para velocidades superiores a 18 m/s. Respecto al offset del anemómetro ultrasónico, se comprueba una vez más que este sensor proporciona valores superiores a los del anemómetro de cazoletas.



- ESTUDIO PARA TEMPERATURAS ENTRE 8,5°C Y 25 °C

En este caso la ecuación obtenida para el rango de temperaturas **mayores a 8,5°C y menores de 25 °C** ha sido:

$$V_{sónica} = 0,97377 \cdot V_{principal} + 0,9921$$

con un valor de **R² = 0.99658**

Bin de Velocidad	Promedio de Vel. Principal	Desv. típica de Vel. Principal	Porcentaje de bin respecto al total de	Promedio de Vel. Sónica	Desv. típica de Vel. Sónica
0	0.35	0.098	0.82%	1.43	0.160
1	1.11	0.259	9.65%	2.09	0.277
2	2.00	0.286	15.81%	2.95	0.320
3	2.99	0.291	15.63%	3.90	0.322
4	3.99	0.284	13.78%	4.86	0.325
5	4.98	0.289	11.19%	5.81	0.346
6	5.98	0.285	9.62%	6.81	0.344
7	6.97	0.287	6.94%	7.79	0.339
8	7.97	0.290	4.52%	8.78	0.342
9	8.97	0.284	3.45%	9.76	0.336
10	9.98	0.284	2.78%	10.76	0.324
11	10.95	0.280	2.00%	11.68	0.322
12	11.93	0.282	1.32%	12.61	0.318
13	12.97	0.283	0.97%	13.60	0.332
14	13.96	0.293	0.62%	14.53	0.377
15	14.92	0.280	0.42%	15.47	0.299
16	15.96	0.254	0.24%	16.47	0.262
17	16.94	0.326	0.09%	17.36	0.542
18	17.98	0.256	0.05%	18.52	0.283
19	19.04	0.340	0.03%	19.55	0.371
20	19.96	0.332	0.03%	20.45	0.270
21	20.91	0.227	0.01%	21.31	0.160
22	21.89	0.205	0.02%	22.29	0.240

Tabla 24. Datos referentes a la velocidad principal y sónica [m/s] para temperaturas mayores de 8,5 °C y menores de 25 °C.

Éste es sin duda el tramo de temperaturas que mayor cantidad de datos congrega. La velocidad a la que los registros empiezan a tener poca frecuencia de aparición corresponde con los 22 m/s. Como viene siendo frecuente en el resto de los intervalos de temperatura, en este se confirma de nuevo el mayor valor de desviación típica y del promedio en el periodo indicado para la velocidad sónica.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



- ESTUDIO PARA TEMPERATURAS MAYORES DE 25 °C

En este último tramo de temperaturas, la ecuación obtenida para el rango de **temperaturas mayores a 25°C** ha sido:

$$V_{sónica} = 0,9868 \cdot V_{principal} + 1.0562$$

con un valor de **R² = 0.9958**

Bin de Velocidad	Promedio de Vel. Principal	Desv. típica de Vel. Principal	Porcentaje de bin respecto al total de datos	Promedio de Vel. Sónica	Desv. típica de Vel. Sónica
0	0.38	0.08	0.10%	1.49	0.15
1	1.17	0.25	4.02%	2.20	0.27
2	2.06	0.27	14.69%	3.09	0.30
3	3.01	0.29	19.05%	4.03	0.30
4	4.00	0.29	17.02%	4.99	0.31
5	4.98	0.29	14.19%	5.96	0.32
6	5.98	0.28	12.46%	6.95	0.33
7	6.95	0.29	8.36%	7.93	0.34
8	7.95	0.29	4.85%	8.94	0.30
9	8.96	0.30	2.61%	9.92	0.32
10	9.95	0.28	1.58%	10.90	0.30
11	10.92	0.28	0.67%	11.79	0.27
12	11.93	0.27	0.29%	12.68	0.29
13	13.13	0.31	0.04%	13.80	0.26
14	13.52	0.02	0.03%	14.19	0.12
15	14.95	0.43	0.03%	15.69	0.16
16	15.72	--	0.01%	16.23	--
17	16.55	--	0.01%	17.47	--

Tabla 25. Datos referentes a la velocidad principal y sónica [m/s] para temperaturas mayores de 25 °C.

Lo más significativo de esta tabla es que mientras que para la tabla 24 empezaban a ser poco representativos los datos medidos a partir de 18 m/s, para estas temperaturas lo hacen para más de 13 m/s (su frecuencia de aparición es muy escasa). Sigue pues la misma tendencia vista con la otra división de temperaturas: a mayor temperatura menores registros de velocidad.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Haciendo un resumen de los resultados obtenidos al hacer los dos análisis, dividiendo en rangos de temperatura todos los datos recogidos en la instalación, las rectas de correlación quedarían como sigue:

	< 8.5 °C	8.5-25 °C	>25 °C	Todas T ^{as}	< 12 °C	12-21 °C	< 21 °C
a	0.976	0.974	0.987	0.9746	0.975	0.974	0.983
b	0.878	0.992	1.056	0.9815	0.897	0.993	1.045
R2	0.998	0.997	0.996	0.9965	0.998	0.997	0.996

Tabla 26. Resumen de las rectas de correlación para todas las temperaturas y sus respectivos rangos.

Si se analiza el valor que toma R^2 en los tramos de temperaturas estudiados, se comprueba que las rectas de correlación más fiables son las evaluadas para bajas temperaturas (menores de 8.5 °C en el primer análisis y menores de 12 °C en el segundo análisis) ya que en estos casos el coeficiente está más cercano a la unidad. En ambos análisis se obtiene un valor del coeficiente de determinación idéntico. El mismo caso se da para las temperaturas medias y altas.

Por otra parte, este coeficiente es menor para los tramos en los que las temperaturas son mayores. Este resultado es coherente puesto que es en este tramo donde menor número de registros se tienen e indicaría una menor fiabilidad de las rectas de correlación para esas temperaturas.

Además se comprueba que, en todo momento, el anemómetro sónico da valores más elevados que el de cazoletas. A medida que la temperatura se eleva, aumenta también el dato dado por este sensor, puesto que el término correspondiente a la ordenada en el origen es mayor en los tramos que pertenecen a temperaturas elevadas.



5.3- Resultados de las pruebas de tendencia

En este apartado se explican los resultados obtenidos de los análisis y pruebas realizadas respecto a las pruebas de tendencia entre los registros, pudiendo encontrar en los anexos información adicional sobre cada uno de ellos.

El procedimiento de cálculo llevado a cabo para el análisis de tendencia, podría dividirse en dos vías:

-La primera se basa en la obtención del valor de la velocidad sónica a través de las rectas de correlación halladas en el apartado anterior para cada tramo de temperatura (de manera que aplicando estas rectas al dato de velocidad principal se obtenga ese valor).

-La segunda vía de análisis consiste en obtener de nuevo el valor de la velocidad sónica para cada valor discreto de velocidad principal, pero esta vez, a partir de un promedio de los valores reales medidos en la estación meteorológica (también se divide según tramos de temperatura).

De esta manera se tendrían dos valores de velocidad sónica a comparar: el valor promedio real procedente de la torre de medición y el valor estimado por las correlaciones.

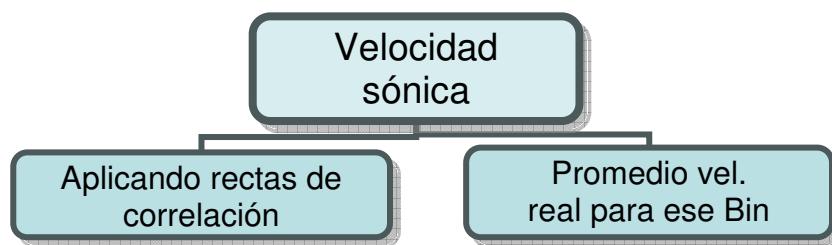


Figura 27. Esquema del cálculo de la velocidad sónica

Como ya se dispone de las rectas de correlación para los distintos tramos de temperatura, se procederá a determinar la velocidad sónica dada por estas rectas para cada bin de la velocidad principal para poder comparar los valores dados por estas rectas con los valores reales medidos por los sensores. Se han determinado las velocidades sónicas hasta un valor de 15 m/s de la velocidad principal, ya que a partir de ese valor los registros reales de la instalación empiezan a escasear.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



-TRAMO DE TEMPERATURAS DETERMINADO POR EL PRIMER ANÁLISIS

En la tabla 28 puede observarse la comparación de los valores de velocidad sónica obtenidos al aplicar a los datos de velocidad principal las rectas de correlación para cada uno de los tramos de temperatura del segundo análisis. A su derecha se encuentra la misma comparación pero, esta vez, la velocidad sónica se ha obtenido de los promedios reales de los datos registrados.

De esta manera se ve que, generalmente, el valor que más se aproxima al dado por la recta de todos los valores de temperaturas es la recta que corresponde al tramo de temperaturas entre 12 y 21 °C, tanto para los resultados al aplicar las rectas de correlación como para el promedio de las velocidades reales. El tramo de temperaturas menores de 12 °C da siempre un valor de temperatura subestimado y el tramo para temperaturas mayores a 21°C sobreestima siempre este valor.

Bin Vel. PPAL	Vel. SÓNICA (Rectas de correlación)				Vel. SÓNICA (Datos reales)			
	Todas T ^a	<12°C	12-21°C	>21°C	Todas T ^a	<12°C	12-21°C	>21°C
0	0.99	0.90	0.99	1.04	1.40	1.35	1.44	1.50
1	1.97	1.87	1.97	2.03	2.07	1.99	2.10	2.18
2	2.94	2.85	2.94	3.01	2.95	2.84	2.94	3.06
3	3.92	3.82	3.91	3.99	3.91	3.80	3.89	4.01
4	4.89	4.80	4.89	4.98	4.87	4.74	4.85	4.96
5	5.86	5.77	5.86	5.96	5.82	5.69	5.80	5.92
6	6.84	6.75	6.83	6.94	6.82	6.69	6.80	6.92
7	7.81	7.72	7.81	7.93	7.80	7.70	7.78	7.90
8	8.79	8.70	8.78	8.91	8.79	8.69	8.75	8.91
9	9.76	9.67	9.75	9.89	9.75	9.67	9.76	9.87
10	10.74	10.65	10.73	10.88	10.75	10.68	10.76	10.88
11	11.71	11.62	11.70	11.86	11.66	11.60	11.71	11.78
12	12.69	12.60	12.68	12.84	12.60	12.56	12.62	12.70
13	13.66	13.57	13.65	13.83	13.61	13.58	13.64	13.70
14	14.64	14.55	14.62	14.81	14.54	14.55	14.58	14.19
15	15.61	15.52	15.60	15.79	15.50	15.51	15.46	15.74

Tabla 28. Comparación de las velocidades sónicas [m/s] dadas por las rectas de correlación de cada tramo de temperaturas y el promedio de las velocidades reales sónicas [m/s].

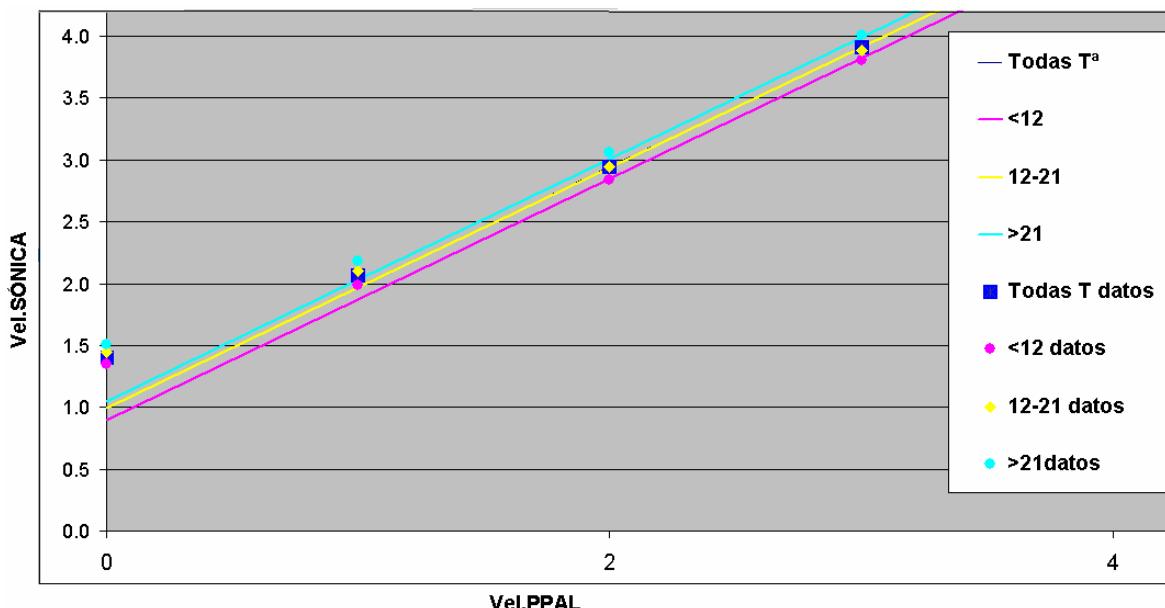
A partir de 10 m/s los resultados reales empiezan a verse afectados debido al poco número de registros que se tienen para determinados bin de velocidad principal.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Si se construye un gráfico que muestre más intuitivamente lo que se acaba de reflejar en la tabla, se obtiene lo siguiente:



Gráfica 29. Representación de las velocidades sónicas [m/s] con las rectas de correlación y con los datos obtenidos de la instalación.

En la gráfica 29 se ha expuesto simplemente una representación parcial de la gráfica general en la que se representan los datos dados por cada una de las rectas de correlación y los obtenidos del promedio de los datos registrados. Se ha escogido el primer tramo de las velocidades porque es donde mejor se aprecia la desviación entre los valores dados por las rectas de correlación y los proporcionados por los datos procedentes de la instalación.

La recta que contiene todos los datos de temperatura está superpuesta a la del tramo central de temperaturas, siendo ésta la que mejor aproxima los datos de velocidad sónica. Es en el momento de arranque del viento cuando hay una diferencia más notable entre los datos proporcionados por los sensores y los calculados a través de las rectas de correlación. Conforme aumenta la velocidad principal estos valores se van aproximando quedando siempre los del tramo superior de temperaturas por encima del valor registrado y los del tramo inferior de temperaturas por debajo de este valor.



-TRAMO DE TEMPERATURAS DETERMINADO POR EL SEGUNDO ANÁLISIS

La tabla 30 corrobora las observaciones realizadas en el anterior tramo de temperaturas, es decir, el valor de velocidad sónica que más se aproxima al dado por la recta de todos los valores de temperatura es la recta que corresponde al intervalo central (entre 8,5 y 25 °C).

El tramo de temperaturas bajas, menores de 8,5 °C, proporciona una vez más un valor de temperatura subestimado mientras que el tramo para temperaturas mayores a 25°C sobreestima siempre este valor.

Esto puede justificarse con que la mayor parte de los registros tomados en la torre meteorológica corresponden al tramo central de temperaturas.

Bin Vel. PPAL	Vel. SÓNICA (Rectas de correlación)				Vel. SÓNICA (Datos reales)			
	Todas T ^a	<8.5°C	8.5-25°C	>25°C	Todas T ^a	<8.5°C	8.5-25°C	>25°C
0	0.99	0.88	0.99	1.06	1.40	1.34	1.43	1.49
1	1.97	1.85	1.97	2.04	2.07	1.98	2.09	2.20
2	2.94	2.83	2.94	3.03	2.95	2.82	2.95	3.09
3	3.92	3.80	3.91	4.02	3.91	3.77	3.90	4.03
4	4.89	4.78	4.89	5.00	4.87	4.72	4.86	4.99
5	5.86	5.76	5.86	5.99	5.82	5.64	5.81	5.96
6	6.84	6.73	6.83	6.98	6.82	6.63	6.81	6.95
7	7.81	7.71	7.81	7.96	7.80	7.67	7.79	7.93
8	8.79	8.68	8.78	8.95	8.79	8.67	8.78	8.94
9	9.76	9.66	9.76	9.94	9.75	9.63	9.76	9.92
10	10.74	10.63	10.73	10.92	10.75	10.66	10.76	10.90
11	11.71	11.61	11.70	11.91	11.66	11.59	11.68	11.79
12	12.69	12.58	12.68	12.90	12.60	12.56	12.61	12.68
13	13.66	13.56	13.65	13.88	13.61	13.64	13.60	13.80
14	14.64	14.54	14.62	14.87	14.54	14.55	14.53	14.19
15	15.61	15.51	15.60	15.86	15.50	15.57	15.47	15.69

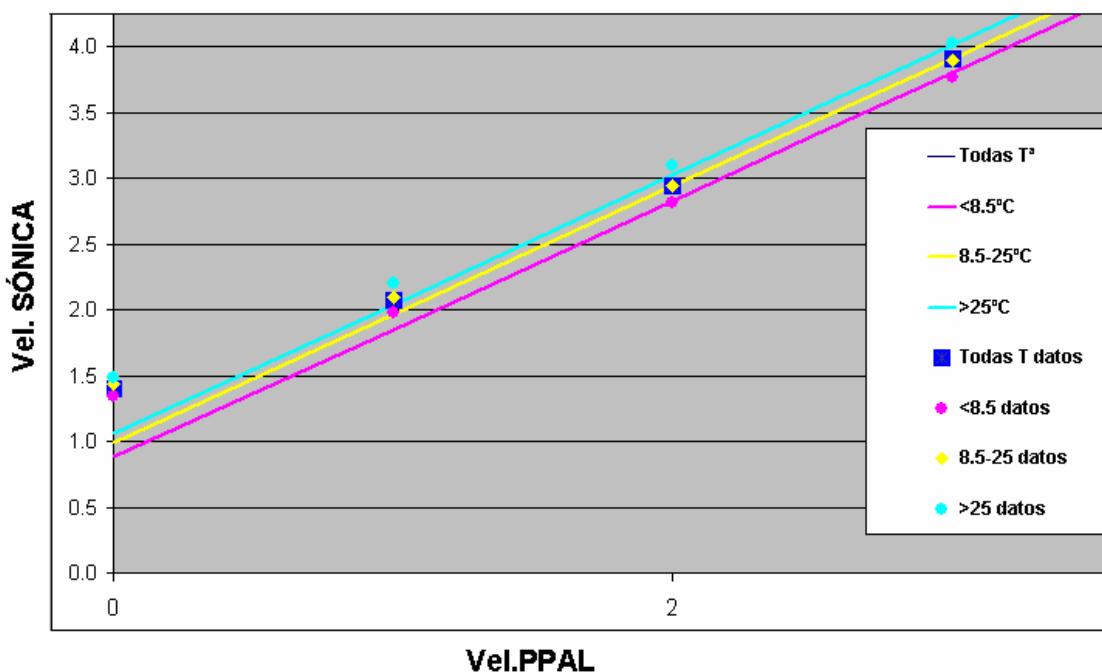
Tabla 30. Comparación de las velocidades sónicas [m/s] dadas por las rectas de correlación de cada tramo de temperaturas y el promedio de las velocidades reales sónicas [m/s].

A partir de 10 m/s los resultados empiezan a verse afectados debido al poco número de registros que se tienen para determinados bin de velocidad principal. Por ejemplo, en el rango de temperaturas mayores de 25°C la instalación no ha proporcionado registros para velocidades del anemómetro principal mayores a 17 m/s.

Esto es razonable ya que, normalmente, para que soplen fuertes rachas de viento la temperatura ambiente no ha de ser muy elevada.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Gráfica 31. Representación de las velocidades sónicas [m/s] con las rectas de correlación y con los datos obtenidos de la instalación.

Al igual que en la gráfica 29, en ésta se ha expuesto una pequeña muestra de los datos correspondientes a las velocidades bajas dadas por cada una de las rectas de correlación y las obtenidas del promedio de los datos registrados.

Una vez más, la recta que contiene todos los datos de temperatura coincide con la del intervalo central de temperaturas. El resultado obtenido en las dos divisiones de temperaturas es el mismo: a bajas temperaturas las rectas de correlación no se aproximan adecuadamente. A temperaturas medias se tiene unas rectas aproximadas pudiendo ser usadas para estimar la producción del aerogenerador. A temperaturas elevadas la falta de registros en la instalación impide establecer conclusiones fiables.

En resumen, en ambos procedimientos se aprecia que existe una diferencia notable entre los valores de velocidad sónica medidos a temperaturas bajas y a temperaturas altas. En el caso de los tramos de temperatura baja se estaría subestimando el valor real de la velocidad sónica y para los tramos de temperatura alta se estaría sobreestimando el mismo valor.



5.4- Resultados de las desviaciones porcentuales

Al haber registrado datos durante un periodo de tiempo tan largo, es complicado apreciar en las gráficas generales cómo afecta cada tramo de temperatura a la medición. Para ver de una manera más clara la desviación de cada una de las velocidades calculadas a través de las rectas de correlación respecto a las registradas para cada bin, se representarán las gráficas que siguen a continuación.

Las tablas en las que se calculan las desviaciones porcentuales se encuentran en el anexo A.6. Puede acudirse allí para obtener más información acerca del análisis llevado a cabo.

-TRAMO DE TEMPERATURAS DETERMINADO POR EL PRIMER ANÁLISIS.

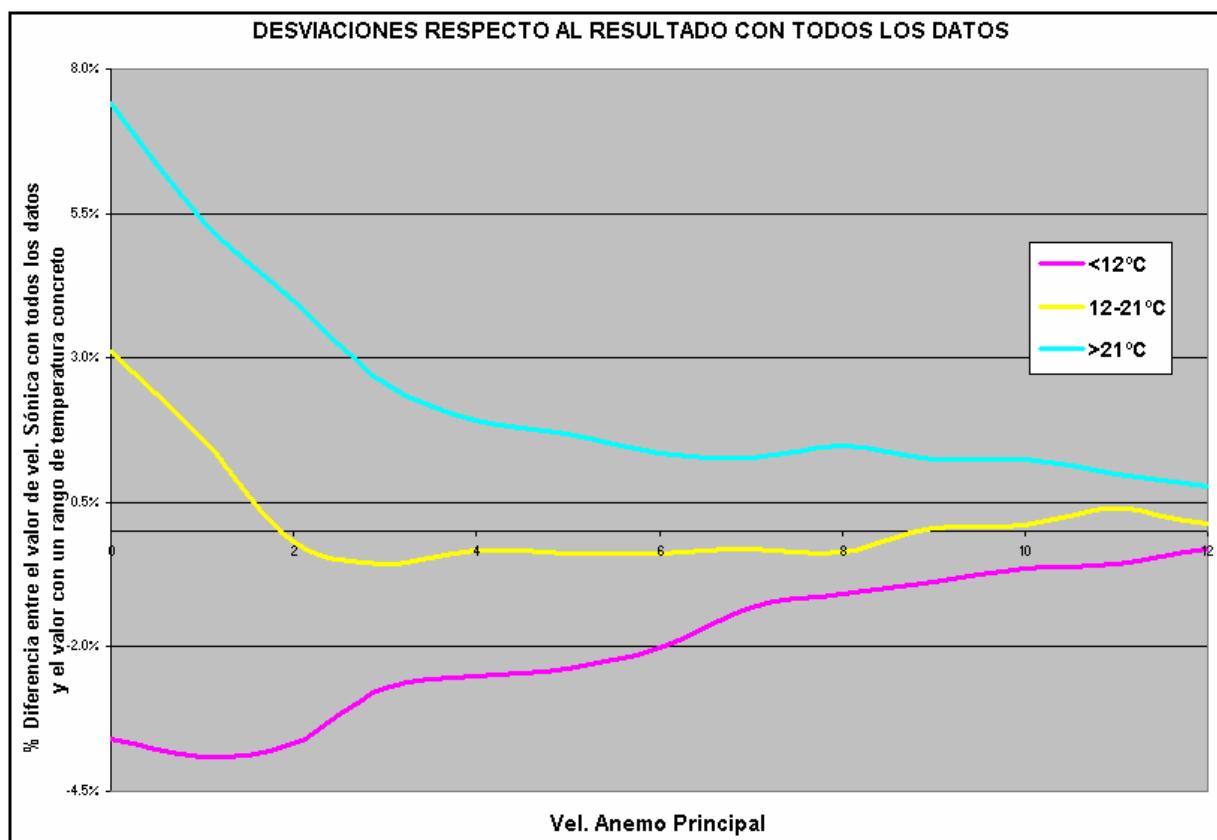


Gráfico 32. Desviación porcentual de los valores de velocidad sónica dados por los diferentes tramos de temperatura respecto al valor proporcionado por todos los datos de temperatura.

Las mayores diferencias porcentuales se encuentran para valores bajos de la velocidad principal. Este hecho podría tener su explicación ya que mientras el anemómetro sónico registra valores de la velocidad del viento aunque ésta sea baja, el anemómetro principal ni se mueve a causa de la fricción que le provoca el rodamiento que lleva incorporado.



Sin embargo, conforme va aumentando la velocidad, todos los rangos de temperaturas se aproximan más al valor dado cuando se tienen todas las temperaturas. Como se ha mencionado en el apartado de las pruebas de tendencia es el tramo central el que más rápidamente se aproxima a lo que ocurre en el caso real (a menores velocidades del anemómetro principal).

-TRAMO DE TEMPERATURAS DETERMINADO POR EL SEGUNDO ANÁLISIS

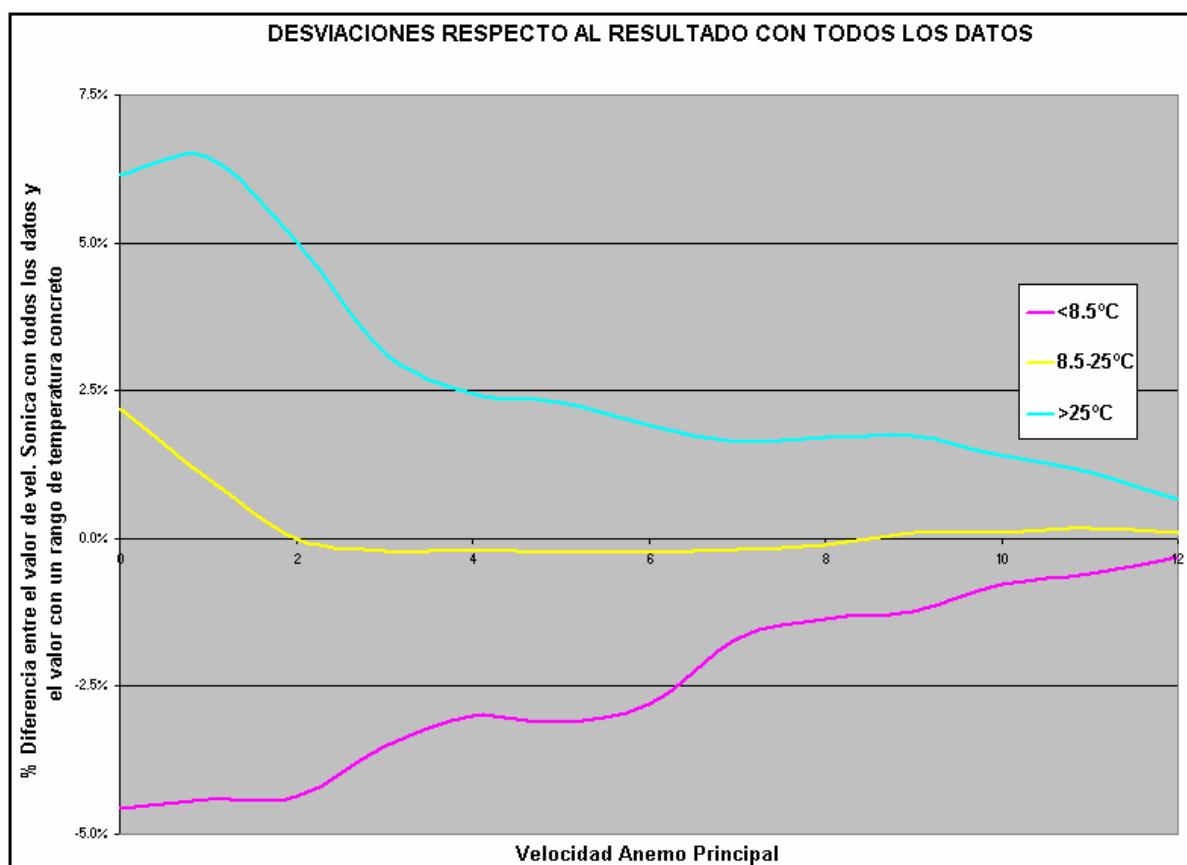


Gráfico 33. Desviación porcentual de los valores de velocidad sónica dados por los diferentes tramos de temperatura respecto al valor proporcionado por todos los datos de temperatura.

Al igual que ocurre con la gráfica 32, en este caso también se encuentran las mayores diferencias porcentuales para valores bajos de la velocidad principal. El comportamiento del tramo central de temperaturas y del tramo inferior es bastante parecido aunque en este caso podría decirse que la correlación dada por el tramo central de temperaturas es más exacta que en el apartado anterior. La línea que corresponde a este tramo se aproxima antes al eje de abscisas.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



El hecho más diferencial en comparación con el gráfico anterior se observa en el tramo de temperaturas altas. En este caso hay una desviación porcentual inicial cercana al 6% mientras que en el caso anterior esta desviación llega hasta un 7,4%.

Sin embargo si se observa el tramo de velocidades entre 4 y 10 m/s, puede decirse que el primer análisis realizado proporciona unos valores de velocidad sónica con menor desviación porcentual.

En cualquier caso, es importante señalar que a pesar de estas desviaciones porcentuales la potencia proporcionada por el aerogenerador no se vería afectada por estos motivos:

-A velocidades pequeñas del viento (menores a 5 m/s) apenas se genera potencia por lo que aunque sea en este tramo donde se encuentran las mayores desviaciones porcentuales, este hecho no afectaría al aerogenerador al estar parado.

-A velocidades medias-altas (en el momento de arranque y cuando se alcanza la máxima producción del aerogenerador) estas desviaciones porcentuales son pequeñas por lo que en este caso, tampoco afectaría de manera grave a la producción.



6. CONCLUSIONES Y POSIBLES ESTUDIOS FUTUROS

Con la realización de este proyecto se ha logrado cumplir el objetivo inicial del mismo que consistía en estudiar la influencia de parámetros externos en los instrumentos de medida de la velocidad del viento. Esta influencia repercutе sobre la estimación de la producción y sobre el cálculo de la intensidad de turbulencia (parámetro básico a la hora de decidir si se puede instalar un aerogenerador en un emplazamiento determinado).

Se han evaluado diferentes variables y se han determinado como las más críticas, la temperatura y la radiación solar. Dado que estas variables están íntimamente relacionadas se ha centrado el estudio en comprobar el efecto de la temperatura en las medidas tomadas por los anemómetros.

Del estudio de comparación de velocidades se deduce que el anemómetro ultrasónico posee un ligero **Offset positivo** respecto al anemómetro principal ya que en todo momento los valores medidos por este sensor son superiores.

Al analizar la intensidad de turbulencia se observa que a menores velocidades se tienen mayores valores de desviaciones estándar en los casos en los que se había medido con anemómetros de cazoletas. A medida que aumenta la velocidad del viento estas desviaciones se van aproximando en los dos tipos de anemómetros. Por lo tanto se ha determinado que el anemómetro sónico tiene menores desviaciones y una mejor reacción que el de cazoletas para los tramos de velocidades bajas.

Se ha observado que las mayores diferencias de registros tomados entre el anemómetro de cazoletas y el sónico corresponden con las bajas velocidades. Esto ocurre así para todos los tramos de temperatura definidos, por lo que en estas condiciones, la causa podría ser la resistencia que ofrece el rodamiento que los anemómetros de cazoletas llevan incorporado (es necesario que sople una mínima corriente de viento para que este sensor comience a medir). Al igual que ocurre con la intensidad de turbulencia, a estas velocidades tan bajas el aerogenerador estaría prácticamente parado (velocidades menores a 4 m/s) por lo que la medición de la velocidad del viento con un anemómetro de cazoletas o con uno sónico tendría un efecto pequeño sobre la producción en el parque eólico.

El análisis de temperatura revela que para los tramos de bajas temperaturas el anemómetro sónico proporciona valores de velocidad subestimados mientras que a elevadas temperaturas estos valores estarían sobreestimados. Por otra parte, a medida que aumenta la velocidad las tendencias en las mediciones tienden a igualarse independientemente de la temperatura, como se ha comprobado anteriormente con la intensidad de turbulencia.



Estudio de la influencia de la temperatura y otros parámetros en la medición de la velocidad del viento



Las posibles aplicaciones futuras que se consideran interesantes para este proyecto así como su continuidad, están relacionadas con la dispersión de datos proporcionados por el anemómetro de cazoletas para bajas velocidades del viento; así como trabajar con medidas con mayor frecuencia de muestreo en lugar de con medias diez-minutales.

Además de seguir investigando en el tema, también sería interesante abrir una línea de investigación centrada en la toma de datos mediante tecnologías que actualmente están desarrollándose, tales como la tecnología LIDAR (Detección y Medición de Luz) o SODAR. Estas nuevas técnicas se basan en la medición por láser.



BIBLIOGRAFÍA

Relación de libros y artículos:

- Energía eólica-Aerogeneradores “Master en mantenimiento industrial y técnicas de diagnóstico” Abel Maestre Gaya, Sevilla 2007-2008
- Gardiner, Brian (1991) Demandas de Energía (pp. 23-35). Zaragoza, España: Editorial Luis Vives.
- UNE-EN 61400-1:2006, Aerogeneradores. Parte 1. Requisitos de diseño 2006
- ENERGÍA EÓLICA, Ana Patricia Talayero Navales y Enrique Telmo Martínez

Relación de webs:

- Asociación Empresarial Eólica, www.aeeolica.es
- Measnet (Measuring Network of Wind Energy Institutes): www.measnet.org
- Revista Energías Renovables: www.energias-renovables.com
- Danish Wind Industry Association: www.windpower.org
- Instituto Universitario de Microgravitación “Ignacio Da Riva”, IDR/UPM
E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Anexo E: Anemometría
sónica: http://ocw.upm.es/ingenieria-aeroespacial/aerodinamica-civil-y-energia-eolica/acee/ACEE_ANEXO-E.pdf
- Centro Nacional de Energías Renovables (CENER): www.cener.es
- RISO DTU: National Laboratory for Sustainable Energy at the Technical University of Denmark: www.risoe.dk
- Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA): www.appa.es
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT): www.ciemat.es