

Ensayo para verificar validez del sensor Hybrid XT¹

Test to verify validity of the Hybrid XT cup sensor

Ismael Benbelkheir Núñez
Estudiantes, IES Plaza de la Cruz, Pamplona, Navarra

Domingo Alfonso Tapia Pastor

Este estudio se centra en el diseño de un plan de ensayos el cual sea capaz de verificar si el anemómetro o sensor de viento Hybrid XT es válido para instalar en un aerogenerador ubicado en el parque experimental de CENER, en la sierra de Alaiz (Navarra), además de comprobar si cumple con la validación. Se ha tratado de utilizar las normativas IEC 61400-50-1 e IEC 61400-12-1. La metodología seguida ha consistido en la comparación de los datos obtenidos entre un anemómetro de referencia y el Hybrid XT, datos que han sido aportados por Siemens Gamesa. Además, se ha realizado el estudio de las variables que puedan afectar al funcionamiento del anemómetro. A partir de las gráficas realizadas y del uso continuo de ecuaciones se ha llegado a la conclusión de que el anemómetro Hybrid XT es válido, independientemente de las variables presentes, para instalarse en el aerogenerador.

Palabras clave: anemómetro, sensor de viento, energía eólica, Hybrid XT, velocidad de viento.

This study focuses on the design of a test plan which is able to verify if the anemometer or wind sensor Hybrid XT is valid to be installed in a wind turbine, located in the experimental part of CENER, in Alaiz's mountain range (Navarre), and if the wind sensor complies with the validation. An attempt has been made to use the IEC 61400-50-1 and IEC 61400-12-1 regulations. The methodology used in this study consists of the comparison between a reference anemometer and the Hybrid XT based on the data given by Siemens Gamesa. In addition, the study of the variables that may affect the operation of the anemometer has been carried out. From the graphs made and the continuous use of equations, it has been concluded that the Hybrid XT anemometer is valid, regardless of the variables present, to be installed in a wind turbine.

Keywords: anemometer, wind sensor, eolic energy, Hybrid XT, wind speed.

Justificación

El cambio climático es un grave problema para la sociedad actual. Diversos estudios no solo advierten que el planeta está sufriendo ya las consecuencias, sino que también reclaman cambios para evitar el desastroso futuro que nos espera si seguimos usando combustibles fósiles (Cordero, 2012).

Las energías renovables suponen un nuevo paso en la revolución tecnológica que está sufriendo el ser humano. Desde hace varias décadas se está tratando de aumentar la energía producida por fuentes renovables. España, junto a la Unión Europea, tiene como objetivo reducir el porcentaje de energía producida por fuentes no renovables, como el carbón o el gas natural. El uso de combustibles fósiles está disminuyendo a medida que suben las renovables (Cordero (2012)).

Es por eso que este estudio es de suma importancia. Esta investigación aportará nuevas informaciones al ecosistema de las renovables, puesto que hasta el momento no existe ningún estudio que diseñe un ensayo para el Hybrid XT Anemometer (7901) Push-Pull Output.

Por otro lado, esta investigación está englobada dentro del marco europeo y la Agenda 2030, enfocándose en los objetivos 7, 11 y 13.

Como residentes de Pamplona, y, por ende, de Navarra,

sabemos de la importancia del sector eólico en esta región pionera en este aspecto. Además, al estar concienciados con el medio ambiente, el tema de esta investigación nos ha motivado y ha sido clave en nuestra elección, pudiendo resultar útil a las empresas del sector.

Para entender lo que se va a estudiar, tendremos que remontarnos a los primeros ensayos que llevaron a cabo un grupo de ingenieros a principios de los años ochenta. La primera estación de ensayos del estado español se creó en Alfabia (Islas Baleares, Mallorca), en 1983, en la sierra de Tramuntana. A partir de entonces, se han ido instalando otras estaciones de ensayo a lo largo de la nación, entre ellas, la estación de la que hemos obtenido.

Un sensor de viento es el elemento que mide la velocidad del viento que llega al aerogenerador. Dependiendo de la velocidad y medidas de estos sensores, las palas adoptan una posición u otra. Si el viento es excesivo el aerogenerador podría romperse, por lo que la medición tiene que realizarse de una manera precisa y cuidadosa para que el aerogenerador funcione en las condiciones más seguras posibles. Este estudio, pues, nace porque se quiere llevar a cabo un nuevo plan de ensayos de cara a corroborar la eficacia de un sensor de viento que vaya a ser colocado en un aerogenerador determinado.

Se prevé que esto incrementará el rendimiento en la energía obtenida.

¹ Esta investigación fue seleccionada por el Comité Científico de URANIA, el Congreso de Investigación Joven de Navarra, para participar mediante una ponencia en la cuarta edición del certamen, que tuvo lugar en Tudela, Navarra, los días 10, 11 y 12 de julio de 2024.

Al ser un estudio de ámbito navarro, aunque con posible implantación en el espectro internacional, los sensores que pasen la validez exigida podrán ser colocados en aerogeneradores de Navarra ya instalados, ya que esta región tiene un tejido empresarial e industrial que permitirá su implantación en la zona.

Aunque este tema ya ha sido tratado y estudiado, en este proyecto se ha investigado cómo pueden aplicarse las normativas existentes para diseñar un ensayo y adaptarlas al problema que se nos plantea. Una vez diseñado el ensayo, se ha realizado la medición e investigación de una muestra de datos para al final ver y comprobar la eficacia y su validez.

Objeto de estudio

En esta investigación se ha trabajado en un tipo de energías renovables que es la energía eólica. Esta consiste en la generación de energía eléctrica a partir de la fuerza del viento que es capturada por las palas de los aerogeneradores.

Existen numerosos tipos de sensores de viento en todo el mercado que ofrecen diversas características, pero no todos han sido válidos ni se han podido utilizar para el aerogenerador. Se ha tenido que conocer de una forma precisa el entorno en el que se ha trabajado con el sensor o en qué parte del molino debe ir colocado, aparte de delimitar los rangos de viento que tiene que medir y la temperatura a la que debe funcionar, entre otras variables a tener en cuenta.

Todos los productos deben pasar por un criterio para valorar si el resultado cumple con las expectativas para lo que se ha diseñado. Una de las técnicas que se emplean para validar el diseño de un producto es elaborar ensayos. Estos pueden hacerse en laboratorios o con el nuevo sensor instalado en el aerogenerador.

En este caso, el producto a validar es un sensor de viento, también llamado anemómetro, que mide su velocidad. En concreto, se busca corroborar la validez de un sensor de viento Hybrid XT (7901), fabricado por NRG Systems, para ser instalado en un aerogenerador, observando que se ratifique su viabilidad para las funciones requeridas.

Además, se ha investigado acerca de los sensores y de qué otros tipos y cuáles son los más empleados para medir las variables atmosféricas más importantes que afectan a la funcionalidad y comportamiento del aerogenerador, tales como la presión atmosférica, la temperatura, la velocidad y dirección del viento...

Con el fin de seguir con el estudio, se ha accedido a ver ensayos que la empresa Siemens Gamesa lleva a cabo en sus instalaciones, y se han recogido datos realizados previamente para poder analizarlos y sacar conclusiones.

Antecedentes

En primer lugar, destacar y resaltar qué son los sensores de viento ya que es con lo que se ha trabajado. Los sensores de viento son dispositivos que miden la velocidad del viento horizontal y vertical, así como su dirección (Sensor De Viento (WS), n.d.). En este caso se utilizó un sensor de tipo cazoletas. Este consiste en tres cazoletas montadas simétricamente alrededor de un eje vertical. Debido a la

fuerza que ejerce el viento rota el eje. La velocidad del viento se mide teniendo en cuenta el número de revoluciones del eje.

También, se han estudiado las variables atmosféricas que afectan al sensor y el cumplimiento de una serie de requisitos. Por otra parte, comentar que Navarra es una región pionera en lo que respecta a las energías renovables. Durante el año 2020 el 23,20% de la energía consumida en Navarra provino de fuentes de energía de este tipo (Gobierno de Navarra, 2019). Esto remarca la gran importancia de este estudio, ayudar a Siemens Gamesa a diferenciarse de otras empresas del sector, obteniendo un nuevo diseño de ensayo para corroborar la validez de un sensor de viento y así contribuir en optimizar el rendimiento de la energía que se obtiene de cada molino.

Este proyecto será apoyado según las bases de varios artículos:

- Desarrollo de un sistema de adquisición de datos de campo para variables ambientales y de un sensor de viento, ambos de bajo costo y de arquitectura abierta (Kimsey et al., 2009)
- Análisis en banco de ensayos de un aerogenerador de 1kW acoplado a diferentes cargas. (García, 2018).

Estos dos trabajos cuentan con carencias, puesto que no tratan temas como la localización del sensor o qué tipo de sensor es más eficiente. Por otro lado, esta investigación aportó datos no utilizados hasta la fecha, además de diseñar un plan de ensayos de sensores de viento diferente a los anteriores.

Kimsey et al. (2009) tratan tanto del desarrollo de un sensor de viento como del de un sistema de adquisición de datos de campo para variables ambientales. La diferencia con este estudio es que en este caso se ha tratado de realizar el diseño de un ensayo para un determinado sensor de viento, y no un sistema de adquisición de datos, puesto que estos han sido aportados por Siemens Gamesa.

Sin embargo, este artículo es de suma importancia porque nos ayuda a entender lo que es un aerogenerador. Además, explica el funcionamiento del sensor de cazoletas, que se compone de copas hemisféricas montadas en los extremos de los brazos distanciados en ángulos iguales y simétricamente (Kimsey et al., 2009), mismo tipo de anemómetro que el Hybrid XT.

El artículo de García nos ha ayudado a tener una base de cómo se crea un plan de ensayos, como la elaboración de mapas de vientos a partir de los datos obtenidos por los anemómetros y en graficar los diferentes perfiles de velocidad de viento (García, 2018). Por otro lado, este se puede relacionar con la publicación de Kimsey, puesto que analiza el comportamiento eólico y eléctrico de una instalación de pequeña potencia y nuestra investigación deberá comprender a su medida el funcionamiento de la instalación eólica CENER, ya que también se ha trabajado en su parque eólico.

A la hora de diseñar un ensayo como el que se ha propuesto en este trabajo, uno de los aspectos clave es tener clara la estructura de los aerogeneradores y estudiar las diferentes tablas con sus curvas de calibración (García, 2018).

Contextualización

La investigación se ha realizado con la colaboración de

la empresa Siemens Gamesa, la cual aportó una explicación sobre los requisitos que el sensor debe tener, además de haber proporcionado datos de medidas de sensores anteriores u otro tipo de información relacionada con la validación de este tipo de sensor.

Para empezar, se ha investigado acerca de los tipos de sensores y se ha aprendido sobre las partes que componen un sensor de viento. Se ha trabajado teniendo en cuenta los diferentes factores que hacen que un sensor funcione y no funcione, tales como la localización, las variables atmosféricas o los materiales.

Se han diseñado varias pruebas para comprobar si el nuevo sensor es aceptable para ser utilizado en los molinos de viento pertenecientes a Siemens Gamesa. Por otro lado, ha sido imprescindible realizar ensayos con un sensor instalado en un aerogenerador, con el objetivo de ver si las mediciones de este se ven afectadas por alguna de las condiciones ambientales o por las variaciones de la velocidad y dirección del viento.

Para poder hacer las pruebas citadas anteriormente se han utilizado aerogeneradores de Siemens Gamesa que se encuentran en el parque experimental de CENER, en la sierra de Alaiz.

Disponen de 6 posiciones calibradas para la realización de ensayos, en las que pueden instalarse prototipos de máquinas de 5 MW, y de 4 torres meteorológicas, de 120 metros de altura (CENER, 2023).

La ventaja de utilizar este parque es que la empresa colaboradora (Siemens Gamesa) tiene aerogeneradores instalados en él y pueden elegir cualquiera para realizar las comprobaciones.

Otro apartado a tener muy en cuenta y que es de vital importancia, es la normativa. Esta investigación se basa en las normas o estándares IEC 61400-50-1 e IEC 61400-12-1. La primera especifica los métodos y requisitos necesarios para aplicar o instalar instrumentos para medir la velocidad del viento. La segunda especifica el procedimiento para medir las características de rendimiento de potencia de una sola turbina eólica.

En ambas se definen procedimientos y métodos que aseguran que las mediciones de viento a partir de anemómetros de cazoletas, montados en mástiles meteorológicos o góndolas de turbinas eólicas, son llevadas y reportadas constantemente y en coordinación con las mejores prácticas.

El sensor a utilizar en esta investigación será el Hybrid XT Anemometer (7901) Push-Pull Output. Este es un sensor del tipo cazoletas. La Tabla 1 muestra las principales características de este sensor.

Tabla 1. Ficha técnica del anemómetro HYBRID XT Anemometer (7901) Push-Pull Output.

Tipo de sensor	Anemómetro de control de turbina de viento de 3 cazoletas
Aplicaciones	Control de turbinas de viento
Rango del sensor	De 0 a 60 m/s, garantía de supervivencia hasta los 90 m/s
Compatibilidad	PLCs, inputs digitales de controladores de turbinas
Certificaciones	CE

Fuente: NRG Systems.

Objetivos e hipótesis

Tomando como base el análisis de los trabajos de investigación citados en el estado de la cuestión y siguiendo las preguntas que se plantean en el objeto de estudio (¿Cumplirá el anemómetro Hybrid XT las necesidades que pide el fabricante? o ¿Qué tipo de ensayo habrá que realizar y qué características ha de tener para comprobarlo?), se establecen una serie de objetivos:

- O1: El principal objetivo consiste en ratificar si el sensor cumple con las expectativas y los requisitos para los que se ha diseñado.
- O2: Uno de los objetivos secundarios es también entender qué son los sensores de viento, cuáles son los más utilizados en el mercado y determinar las variables más relevantes, además de seguir las diferentes normas y poner en práctica protocolos relacionados con la medida del viento.
- O3: Por último, se busca definir un ensayo o conjunto de ensayos para analizar si el sensor Hybrid XT cumple con lo que dicta su hoja de especificaciones y si es válido para instalar en uno de los aerogeneradores del parque experimental de CENER.

A partir de los objetivos planteados y teniendo en cuenta el porqué, se dictan las siguientes hipótesis:

- H1: La primera hipótesis planteada es que el sensor utilizado, el Hybrid XT, cumple con las especificaciones dadas por el fabricante (NRG Systems) y verificar si cumplen los requisitos de Siemens Gamesa. Esta hipótesis surge del primer objetivo. Se considera que esto será acertado debido al gran prestigio que tiene NRG system, ya que una empresa reconocida mundialmente no debería tener errores significativos en la ficha técnica de sus productos.
- H2: La segunda hipótesis es que los sensores de viento tienen que tener una precisión suficiente en rangos de viento amplios. Se plantea la H2 puesto que los sensores de baja sensibilidad están diseñados para vientos muy fuertes y los de alta sensibilidad para los muy suaves. Debido a esto, un sensor apto para la colocación en un aerogenerador ha de tener un equilibrio entre sensibilidades altas y bajas, pero que a su vez soporte todo tipo de rangos de valores de medida, ya sean altos o bajos. El rango a medir tiene que estar entre 0 y 70 m/s y se debe adoptar una precisión del 98%.

Metodología

Diseño

Esta investigación se ha realizado entre octubre del 2022 y noviembre del 2023. La parte experimental, en el que se ha trabajado con datos obtenidos de los sensores instalados, se ha llevado a cabo de enero a junio de 2023.

El ensayo se ha creado con los datos aportados por Siemens Gamesa y por sus ensayos de referencia. Se ha dividido en tres fases:

1. Definición de ensayo. En esta fase el ensayo queda definido con detalle a partir de unos requisitos de producto cuyo cumplimiento tiene que ser demostrado. El principal objetivo de esta fase ha sido la especificación del ensayo y conocer los requisitos del

sensor. Ha sido necesario conocer la normativa y estándares aplicables, como la de IEC 61400-12-1 y la de IEC 61400-50-1. También conocer y saber identificar las diferentes variables a medir como la precisión, resolución, punto de medida, rango de variación, ancho de banda, etc. El tipo de instrumentación y su configuración se ha tenido que definir con precisión. La especificación de ensayo ha incluido los esquemas de la instalación asociada a la instrumentación del ensayo que conforme la cadena de medida. Se han estudiado diferentes tipos de criterios en relación con la instrumentación, como el criterio de selección de componentes, el criterio de instalación de equipos, el criterio de conexión y comunicación de equipos, el de sincronización entre sistemas de adquisición, actuadores y el criterio para la recepción y adaptación de equipos. La fase de instalación ha sido ejecutada completamente por Siemens Gamesa. A partir de las variables obtenidas y definidas para el sistema de adquisición, debe definirse todo el tratamiento que hay que aplicar a los datos. Este tratamiento generalmente ha incluido el cambio de unidades, la corrección de datos, el cambio de sistemas de referencia, los filtros digitales, interpolación o diezmado, cálculo estadístico, la binarización o clasificación y el rechazo de datos no útiles. Para ello, se han tenido en cuenta los requisitos de los sensores de viento representados en las siguientes tablas (ver Tabla 2 y Tabla 3):

Tabla 2. Requisitos del sensor de viento: variables atmosféricas.

Temperatura	(-20°C a +50 °C)
Humedad	≤100
Altitud (m)	De 0 a 2000
Intensidad de la Radiación Solar (W/m ²)	1200
Densidad del Aire (kg/m ³)	0,9 a 1,225

Tabla 3. Requisitos del sensor de viento

Rango de medida	0... ≥ 70 m/s
Precisión	El valor absoluto de la diferencia entre el viento de referencia (túnel) y la medición del sensor debe ser inferior a 0,3 m/s o 2 % para cada valor de viento y cada sensor.
Repetitividad (Variación de sensor a sensor)	Los resultados de las pruebas en túnel de viento garantizarán que el 95 % de la población de sensores se encuentra dentro de un intervalo de ±0,3 m/s, siguiendo una distribución t de Student. Ejemplo: para una prueba de 15 muestras a una velocidad del viento de referencia dada, los resultados promedio y estándar deben cumplir con (Ref. viento medio) ± 2,131*std ∈ [-0,3, +0,3].
Umbral inicial	≤ 2,5 m/s a densidad=1,225 kg/m ³ (≤ 3 m/s a densidad=0,9 kg/m ³)
La calibración del anemómetro de cazoletas será independiente de la dirección del viento.	
El coeficiente de correlación de linealidad en la calibración deberá cumplir el requisito: r ≥ 0,99999	

Fuente. Elaboración propia a partir de la información solicitada a Siemens Gamesa.

2. Montaje. En esta fase se ha montado un prototipo en la instalación de ensayos, que puede ser un banco o un aerogenerador, instrumentado y puesto a punto para que se lleve a cabo el ensayo. Durante el montaje se han tenido en consideración algunas pautas, de las cuales, en su mayoría, han sido realizadas por Siemens Gamesa. Estas pautas han sido:

- Procedimientos de transporte, descarga y manipulación de componentes.
- Procedimiento de montaje.
- Procedimiento de configuración del software.
- Especificación de ensayo. Se ha tenido que conocer la instrumentación del ensayo, añadiendo también la calibración de cadena de medida. Más adelante, se han realizado pruebas previas de conjunto y se ha verificado si el banco de ensayos está preparado para la realización del ensayo bajo las condiciones de operación en la especificación de ensayo. También, en la inspección previa, se ha tenido que tener en cuenta:
 - Verificación del entorno del ensayo y su influencia sobre el mismo.
 - Detección de defectos causados por el proceso de fabricación, montaje u operación.

3. Ejecución. La ejecución se ha realizado según las planificaciones que determinan en qué condiciones y momentos deben ejecutarse las diferentes maniobras. Se ha tenido que desempeñar un registro temporal de elementos, como los eventos, errores, cambios (dentro de los cambios se pueden destacar los que se encuentran en la configuración de desarrollo, en los casos del ensayo y en la cadena de medida) y las comprobaciones o revisiones. Dicho esto, se han realizado informes de ensayo parciales. Se han comprobado las degradaciones o cambios de las condiciones de ensayo y ha sido necesario programar inspecciones que garanticen el cumplimiento de las especificaciones de ensayo. Esto último, ha sido controlado y verificado por Siemens Gamesa. Se han tenido que aplicar las pautas determinadas en el apartado 9 de la norma IEC 61400-50-1, en donde se ha comprobado que un anemómetro no cambia su calibración durante un periodo de medición y se pueden llevar a cabo dos métodos posibles. El método a utilizar ha sido el de realizar una comparación in situ, que consiste en comparar el anemómetro primario (Hybrid XT) con otro instalado en las proximidades (sónico) durante el periodo de medición.

Análisis

Con la finalidad de sacar una conclusión de los ensayos, se han utilizado una serie de fórmulas matemáticas extraídas de la normativa IEC61400-50-1 (Ecuación 26) que permitan demostrar y determinar si el sensor experimentado es válido. Una de las que se han utilizado tiene la finalidad de calcular la incertidumbre estándar de las diferencias de velocidad del viento (desviación estadística) del anemómetro, tal como se muestra en la siguiente expresión.

$$\sigma = \frac{\text{stdev}(y)}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V_{\text{primary_est}} - V_{\text{primary}})^2}{n}}}{\sqrt{n}}$$

La fórmula de la incertidumbre estándar tiene como objetivo expresar la medida de dispersión de la medición. Esto expresa un rango de valores en el que se encuentra el verdadero valor medido con una probabilidad que suele ser del 95% (Testo Industrial Services, 2023). Al poner este ejemplo se puede destacar un dato importante ya que, si la raíz-media-cuadrada del promedio de diferencias (desviación sistemática) y el estándar de incertidumbre de las diferencias de velocidad del viento (desviación estadística) no supera los 0,1 m/s en ningún intervalo de velocidades comprendidas entre 4 m/s y 12 m/s, habrá pasado satisfactoriamente la prueba in situ. Esta ecuación no se ha utilizado en esta investigación, debido a que, a la hora de calcular los errores en el apartado de metodología, se ha optado por otra forma de realizar el estudio, el correspondiente al apartado de metodología.

Por otra parte, se han hecho tablas cuya finalidad ha sido hallar el promedio, el valor máximo, el valor mínimo y la desviación estándar de los datos obtenidos en ellas. Además, ofrece información para próximas gráficas.

Una vez obtenidos los resultados de las tablas y las variables estadísticas, se han creado diferentes gráficas a modo de expresar el resultado de las experimentaciones. Estas han sido de diferente tipo, tales como histogramas, gráficos de dispersión y de regresión lineal.

Los histogramas se han utilizado con el objetivo de comprobar si la cantidad de datos obtenidos en todos los rangos de viento es suficiente para llegar a un resultado. Estos han sido estructurados de forma que la variable independiente sea la velocidad de viento establecida en distintos rangos o bins de viento. En la variable dependiente se ha mostrado la media de valores obtenidos por los sensores en intervalos de diez minutos. Esto facilita la organización de los datos utilizados.

Siemens Gamesa ha proporcionado un fichero con los datos recogidos en un aerogenerador:

Los datos corresponden al aerogenerador nº2 ubicado en el parque experimental de CENER, en la sierra de Alaiz (Navarra, España). Se han utilizado datos diezminutales obtenidos entre el 2 de enero de 2023 y el 11 de junio de este mismo año.

Para hacer los análisis se han registrado variables de diferentes sensores descritos en el siguiente listado:

1. Sensor sónico de viento Thies (la referencia).
2. Sensor de cazoletas Hybrid XT.
3. Sensor de lluvia.
4. Termómetro.
5. Higrómetro.
6. Barómetro.

Los sensores de viento están ubicados en la góndola del aerogenerador y el resto en el mástil meteorológico.

Las coordenadas del mástil de referencia y las del mástil de la futura localización de la turbina (WT mast) fueron, respectivamente: 617'703.8 E y 4'728'146.6 N; 617'571.7 E y 4'727'813.3 N (UTM ED50).

Los parámetros utilizados a la hora de calcular la media diezminutal derivada de la densidad del aire son:

1. T_{omin}= es la medida absoluta de la media diezminutal de la temperatura del aire [K].
2. B_{omin}= es la media de la presión atmosférica.

3. R_o es la constante del gas del aire seco, 287,05 [J/kgK].
4. Φ es la humedad relativa (rango 0 % a 100 %).
5. R_w es la constante del vapor de agua 461,5 [J/kgK].
6. P_w es la presión del vapor de agua normalizada a 0,00002050,0631846 T_{omin} [Pa].

Resultados

A la hora de señalar los resultados es necesario recalcar cómo cada variable puede afectar al resultado final de las pruebas. Por ende, se han realizado numerosas pruebas variando considerablemente cada parámetro.

Plan de ensayos

Para cada requisito que establece Siemens Gamesa como válido, se han analizado los datos suministrados por el fabricante y además se ha identificado cómo podría verificarse su idoneidad experimentalmente.

En esta tabla (Tabla 3), se indica cada variable, además de argumentar cómo se podría verificar y señalar los diferentes factores que se deben medir y que los requisitos son los mínimos que pide Gamesa para cada variable.

Se ha analizado si se podría hacer con ensayos en Alaiz (Navarra, España) esas verificaciones y se han extraído las conclusiones del ensayo. Se puede apreciar qué variables se han probado y si hay datos del fabricante

Del análisis de esta tabla se determina que hay 3 variables que no se han podido experimentar ni probar. Por ejemplo, en la altitud no se han realizado ensayos para comprobar si el sensor es válido en el rango de medida que va desde 0 a 2000 metros. Esto último es debido a que solo disponemos de un lugar específico para hacer las pruebas, por lo que resulta imposible hacer las comprobaciones a distintas alturas. Las mediciones se han realizado en la Sierra de Alaiz (Navarra, España). La intensidad de radiación solar, tampoco se ha comprobado porque no dispone Siemens Gamesa de unos sensores que miden dicha variable. Por último, no se ha comprobado la repetitividad ya que no disponen de más de un sensor y porque no se han realizado ensayos en los túneles de viento, si no que se realizan en campo abierto.

Para calcular con exactitud el error en cada punto se han obtenido diferentes ecuaciones. Se ha comparado el valor de la velocidad de viento frente a distintas variables. Se han realizado las gráficas con dos sensores distintos para poder mostrar el error que puede tener el Hybrid XT frente al de referencia (sensor sónico). Este se ha calculado restando la velocidad de nuestro sensor de viento (Hybrid XT) con el sónico, todo esto según cada variable. Se calcula para comprobar si el sensor de cazoletas cumple con los requisitos mínimos de la tabla de validación de requisitos según cada variable.

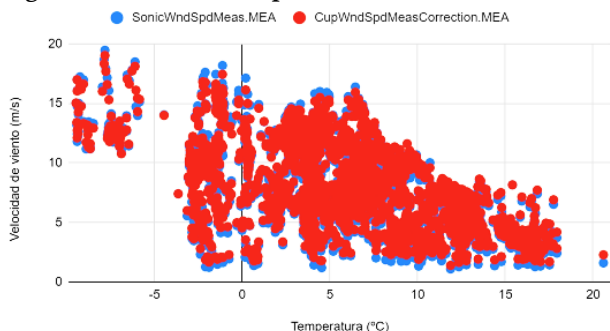
No obstante, se reflejaron los errores en la medida con distintas gráficas que determinan la imprecisión en la medición de los datos. Se refleja una ecuación con la cual se calcula el error y una línea de tendencia que determina si el error es mayor o menor (Magnitud).

Temperatura

A la hora de realizar la verificación del cumplimiento

preestablecido en la variable de temperatura se han representado los datos en un mismo gráfico, con el fin de comprobar con mayor precisión los valores dados. Se ha hecho la comparación entre el sensor de cazoletas Hybrid XT y un sensor de viento sónico de referencia. La Figura 1 se ha obtenido con los datos anteriormente filtrados, según la tabla de validación de requisitos (Tabla 3), debido a que el anemómetro solo puede registrar unos intervalos de datos de entre -10 a 20 °C.

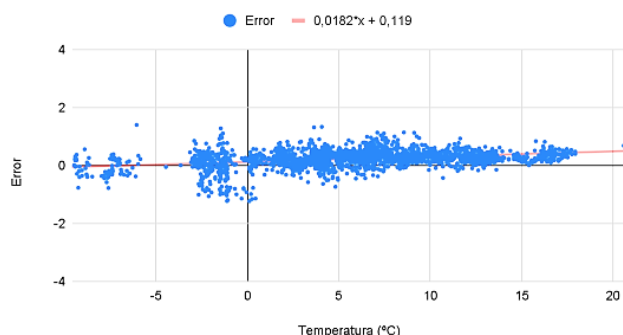
Figura 1. Gráfico de temperatura.



Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 2 se han demostrado gráficamente los errores en la medida del sensor Hybrid XT comparados con las de un sensor sónico, el cual se utilizó como referencia.

Figura 2. Gráfico del error en la medida del viento dependiendo de la temperatura.



Fuente. Elaboración propia.

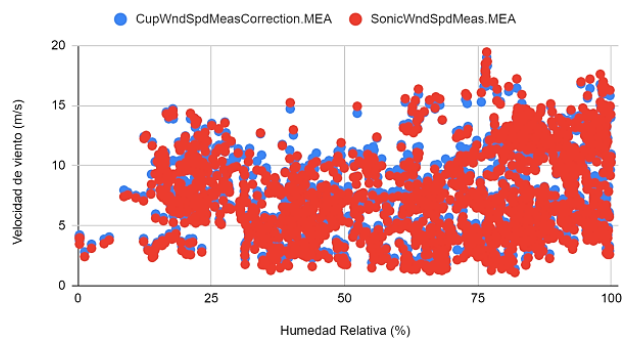
Además, se ha obtenido una ecuación que refleja el error en la medida. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$\text{Error en la medida} = -0,0182 * \text{temperatura del anemómetro sónico} + 0,119$$

Humedad relativa

Para validar si la humedad cumple los requisitos preestablecidos se ha comparado el sensor de cazoletas con el sónico como referencia. Y para presentar gráficamente los datos se ha realizado una gráfica con los dos sensores en el eje y y humedad en el eje x. Se puede observar en la Figura 3.

Figura 3. Gráfico de humedad relativa.

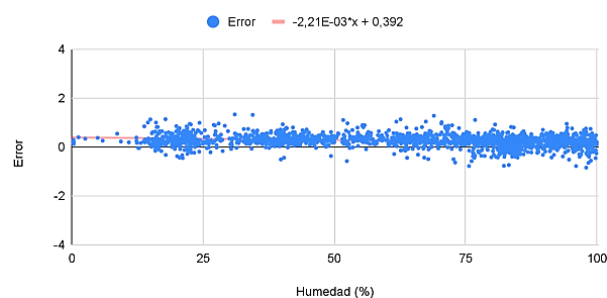


Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 4 se han presentado los errores en la medida de humedad en el sensor Hybrid XT comparado con un sensor sónico. Se han obtenido varios datos en puntos los cuales tienen una tendencia, la cual se refleja con una línea roja presentada en la gráfica. La ecuación obtenida para el cálculo del error en la medida dependiendo de la humedad relativa es la siguiente:

$$\text{Error en la medida} = -2,21 * 10^{-3} * \text{humedad relativa del anemómetro sónico} + 0,392$$

Figura 4. Gráfico del error en la medida del viento dependiendo de la humedad relativa.



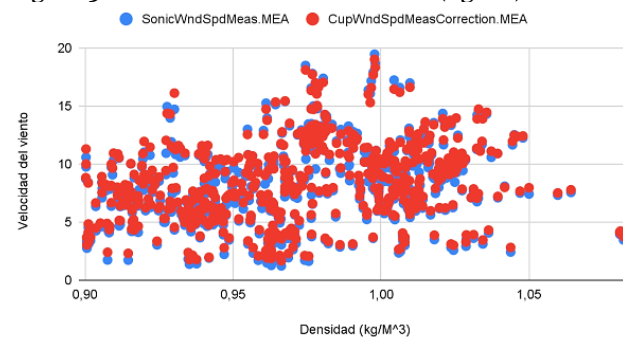
Fuente. Elaboración propia.

Densidad del aire

Para comprobar la validez del sensor en cuanto a la densidad del aire se ha realizado un estudio de datos los cuales se ven reflejados en la Figura 5 y en la Figura 6, y comparar los datos del sensor con otro distinto de referencia. La ecuación obtenida es la siguiente:

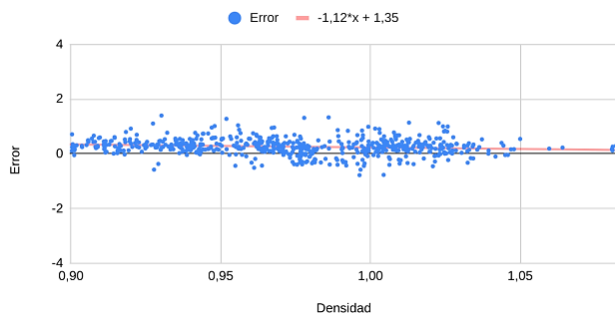
$$\text{Error en la medida} = -1,12 * \text{densidad del aire del anemómetro sónico} + 1,35$$

Figura 5. Gráfico de densidad del aire (kg/m³).



Fuente. Elaboración propia.

Figura 6. Gráfico del error en la medida del viento dependiendo de la densidad.



Fuente. Elaboración propia.

Rango de viento

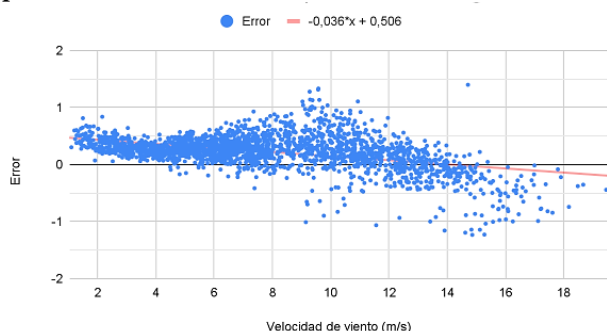
Se han establecido los máximos y mínimos de cada sensor reflejando la velocidad de viento en m/s. La Figura 7 representa el error en la medida de viento frente a la medida de viento del anemómetro sónico. El error en la medida de viento se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Error en la medida} = \text{Velocidad del Hybrid XT} - \text{velocidad del anemómetro sónico}$$

Además, en la gráfica se representa en rojo la extrapolación lineal de la distribución de los datos y se ha extraído la ecuación que relaciona las dos variables: el error en la medida y la velocidad del viento. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$\text{Error en la medida} = -0,036 * \text{velocidad del anemómetro sónico} + 0,506$$

Figura 7. Gráfico del error en la medida del viento dependiendo de la humedad relativa.



Fuente. Elaboración propia.

Análisis y discusión

Finalmente se ha obtenido una serie de conclusiones con el fin de hallar si en realidad las variables establecidas tienen influencia o no en la medida.

Teniendo en cuenta las especificaciones dadas por Siemens Gamesa que exigen la precisión que el sensor tiene que tener, se ha realizado un análisis sobre el error obtenido y si en consecuencia cumple o no con las expectativas.

Para comprobar si durante en todo momento los datos dados en una variable superan o no el requisito pedido por Siemens Gamesa, se han llevado a cabo los errores en la

medida en las diferentes variables.

Para ello, se ha comparado las velocidades de viento de nuestro sensor (Hybrid XT) con un sensor de referencia (Sónico) Posteriormente se ha relacionado con las distintas variables para poder comprobar si el error dado supera o no al error máximo permitido. El error máximo permitido se ha calculado según la tabla 3, de la siguiente manera. Y para reflejar el error se ha utilizado una línea de tendencia, esto es una recta que refleja la dirección de todos los puntos:

$$\begin{aligned} \text{Error máximo} &= 2\% (\text{velocidad de viento máxima}) + 0,3 \\ \text{Error máximo} &= 2\% (70 \text{ m/s}) + 0,3 = 1,7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Durante el proceso de realización de este estudio se han observado varias limitaciones que han dificultado la realización de este ensayo. Sin más dilación, al tener únicamente un lugar concreto para la ejecución de las pruebas. Esto ha obstaculizado el hacer los ensayos a diferentes alturas, por lo que esto no se ha podido comprobar.

El error más importante que se ha realizado es el uso de filtros en datos no adecuados. A la hora de reflejar visualmente, en gráfico, se reflejaban pocos datos y no era preciso. Lo cual se solucionó posteriormente con la extracción de los filtros de datos, y el uso de todos los datos, en los rangos de medida posibles.

Son varias las perspectivas futuras que se tienen a este trabajo de investigación. Para empezar, se podrían realizar las pruebas a diferentes alturas. Esto podría realizarse teniendo varios lugares en los que ejecutar los ensayos.

Por otro lado, otra perspectiva futura es la intención de adoptar nuevas tecnologías al aerogenerador en un futuro.

Conclusiones

En definitiva, en este trabajo se han realizado numerosos estudios en relación con el aerogenerador. En el proyecto se habían postulado varios objetivos e hipótesis, que se han ido discutiendo a lo largo de la investigación.

Se ha cumplido el objetivo propuesto, puesto que según los resultados obtenidos en el estudio y en las gráficas realizadas, se ha verificado que el sensor cumple con los requisitos necesarios pedidos por Siemens Gamesa.

El objetivo especificado al principio de este trabajo ha sido cumplido. Se ha conseguido obtener todos los conocimientos necesarios para la realización de este trabajo. Además, se ha hecho la tabla de validación de ensayos (tabla 4, Anexo) con el fin de clarificar y estudiar independientemente cada variable.

El tercer objetivo se ha corroborado utilizando la hoja de especificaciones del Hybrid XT (Tabla 1) y se han realizado varias gráficas para conseguir una visualización gráfica de los datos en los rangos de medida establecidos por dicho sensor.

La hipótesis planteada antes del estudio de datos, viene de O1 ya que viene dada por las hojas de especificaciones de NRG Systems. Después del extenso análisis y de la realización de diferentes pruebas y comparaciones, se ha llegado a la conclusión de que la hipótesis es acertada ya que el O1 ha resultado ser corroborado.

La segunda hipótesis postulada explica que el sensor debería de tener una precisión suficiente en rangos de viento amplios. Y en este caso, según la hoja de especificaciones se ha tenido que medir entre 0 y 70 m/s y en consecuencia

adoptar un 98 % de precisión. Para ello se ha comparado el error determinado por la fórmula del error en la medida de velocidad de viento con el propuesto del 2% +/- 0,3. Finalmente, se han conseguido unos datos que corroboran la hipótesis como cierta, ya que se encuentra un error menor al máximo permitido salvo en el rango de 0 m/s y en el de 60m/s.

Bibliografía

- CENER. (2023). Parque Eólico Experimental de CENER. CENER. Retrieved March 21, 2023, from <https://www.cener.com/areas-de-investigacion/energia-eolica/infraestructuras-y-recursos-tecnicos/parque-experimental-de-alaiz/>
- Díaz Cordero, G. (2012, Abril - Junio). El cambio climático. Dialnet. Retrieved March 19, 2023, from <https://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/handle/123456789/1392/CISO20123702-227-240.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Framesper. (2019, Mayo 23). How do Wind Turbine works | Wind energy | Working principles of wind turbine. <https://www.youtube.com/watch?v=cZtyBk85Fwg>
- Gobierno de Navarra. (2019, December 20). El 23,20% del consumo total de energía en Navarra procede de fuentes renovables. navarra.es. Retrieved March 14, 2023, from <https://www.navarra.es/es/noticias/2019/12/20/el-23-20-del-consumo-total-de-energia-en-navarra-procede-de-fuentes-renovables>
- Kimsey, J. Q., Hostaller, N. H., & Jiménez, A. C. (2009, Mayo 18). Desarrollo de un sistema de adquisición de datos de campo para variables ambientales y de un sensor de viento, ambos de bajo costo y de arquitectura abierta. Repositorio TEC. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5776>
- Mur Amada, J. (2010). Sensores utilizados en energía eólica. Gestión de parques eólicos. Retrieved June 13, 2023, from <https://www.windygrid.org/sensores.pdf>

Fecha de recepción: 20 de diciembre de 2023
 Fecha de aceptación (provisional): 4 de abril de 2024
 Fecha de aceptación (definitiva): 12 de junio de 2024



Copyright ©
 Asociación por la Investigación
 en Educación Secundaria
 AINVES

C/ Carlos II, 17
 Madrid
 28022

Tabla 4. Plan de Validación de requisitos de cada variable

Requisito	Datos del fabricante del sensor (NRG)	Referencia	¿Cómo podemos probarlo?	Conclusiones	Variables a medir	
<i>Temperatura</i>	-20°C - 50°C	Si. -40 ° C a 50 ° C Ambiente	HYBRID XT Anemometer. PDF (Anexo 1)	Medir la velocidad del viento desde -20°C a 50°C	El ensayo se hará sólo a las temperaturas ambientales durante el tiempo de medida	Velocidad de viento y temperatura.
<i>Humedad Relativa (%)</i>	≤100	Si. De 0 a 100%	HYBRID XT Anemometer. PDF (Anexo 1)	Medir la velocidad del viento desde 0 a 100% RH.	El ensayo se hará a la humedad ambiente en el tiempo que dure la medida	Humedad (Higrómetro) Velocidad del viento.
<i>Altitud (m)</i>	0 - 2000	No		Experimentar a 0 y a 2000 m	No vamos a realizar un ensayo para comprobar este requisito	
<i>Intensidad Radiación Solar (Energía emitida por el sol. Como radiación electromagnética)</i>	1200 W/m ²	No		Mediante el sensor piranómetro (radiación)	No vamos a realizar un ensayo para comprobar este requisito por no disponer de estos tipos de sensor para llevar a cabo estos test	
<i>Densidad del aire (kg/m³)</i>	0,9 a 1,225	No		Investigar con 0,9 kg/m ³ y con 1,225 kg/m ³ Con el instrumento aerómetro		Temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y la concentración de CO ₂ (en algunos casos)
<i>Rango de velocidad</i>	0≥70 m/s	Si* Measuring range 0 to 60 m/s (133 mph) Guaranteed survivability to 90 m/s (200 mph)	HYBRID XT Anemometer. PDF (Anexo 1)	Realizar ensayos. Medir la velocidad del viento desde 0 a 70 m/s	La investigación se hará al rango de velocidad ambiente en el tiempo que dure la medida	Velocidad del viento
<i>Precisión</i>	Superior al 98%	Si. +/- (0,3 m/s + 2% of measured value)	HYBRID XT Anemometer. PDF (Anexo 1)	Realizar un gráfico comparativo	La investigación se va a realizar con los datos de un ensayo en un túnel de viento	
<i>Repetitividad (Variación de sensor a sensor)</i>	Los resultados de las pruebas en túnel de viento garantizarán que el 95 % de la población de sensores se encuentra dentro de un intervalo de ±0,3 m/s, siguiendo una distribución t de Student.	No		Realizar pruebas de velocidad de viento con un número de sensores.	No vamos a realizar ensayos. Porque no se van a realizar en túneles de viento. Y no disponemos de más de un sensor.	
<i>Umbral inicial</i>	2,5 m/s a densidad=1,225 kg/m ³ (≤ 3 m/s a densidad=0,9 kg/m ³)	No		Identificar cuál es el valor mínimo de la velocidad del viento.		Velocidad de viento y densidad del aire.