

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p style="text-align: center;">ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p style="text-align: center;">Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p style="text-align: center;">3322.02 Generación de energía</p> |

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA

Aitor Agirre^{1†}, Juan José Costa^{1†}, Mikel Ezkurdia^{1†}, Haitz Gezala^{1†}, Orkatz Askasibar¹, Xabier Agirre¹, David Cabezuelo¹, Gonzalo Abad¹

¹Mondragon Unibertsitatea, Departamento de electrónica e informática, Loramendi 4, 20500 Mondragon, Pais Vasco, Spain.

[†]Comparten mismo nivel de responsabilidad en el artículo

Recibido: DD/MM/AA – Revisado: DD/MM/AA -- Aceptado: DD/MM/AA - DOI: <https://dx.doi.org/10.6036>

| | |
|---|---|
| <p>ABSTRACT:</p> <p><i>Within the current energy revolution, wind energy is playing an increasing role. However, small-scale generation technologies, such as mini-wind turbines, are less developed.</i></p> <p><i>In this paper, firstly, the feasibility of the recently rediscovered Ayanz mill for small-scale power generation will be studied. As a main result, it has been concluded that the Ayanz windmill with deflector is comparable to current turbine designs such as the Savonius.</i></p> <p><i>In addition, two alternatives have been proposed to simplify the associated electronics and increase the efficiency of the system: first, avoiding the need for a microcontroller by using an analog circuit that emulates the MPPT (Maximum Power Point Tracking) control; and another alternative avoiding the use of a power converter or active control, simplifying the whole system.</i></p> <p><i>Keywords: mini-wind turbine, MPPT, Ayanz windmill, wind energy, low-cost control, open access</i></p> | <p>RESUMEN:</p> <p>Dentro de la revolución energética actual, la energía eólica tiene un papel creciente. No obstante, las tecnologías de generación a pequeña escala, como las turbinas mini-eólicas, están menos desarrolladas.</p> <p>En este documento, inicialmente, se estudiará la viabilidad del recientemente redescubierto molino de Ayanz para la generación eléctrica a pequeña escala. Como principal resultado, se ha concluido que el molino de Ayanz con deflector es equiparable a diseños de turbinas actuales como el Savonius.</p> <p>Además, se han planteado dos alternativas para la simplificación de la electrónica asociada y aumentar la eficiencia del sistema: una primera, evitando la necesidad de microcontrolador mediante el uso de un circuito analógico que emule el control MPPT (Maximum Power Point Tracking); y otra alternativa evitando el uso de convertidor de potencia o control activo alguno.</p> <p>Palabras clave: turbina mini eólica, MPPT, molino de Ayanz, energía eólica, control de bajo coste, open Access</p> |
|---|---|

1.- INTRODUCCIÓN

En el presente artículo, se analiza uno de los dos molinos de viento patentados por Jerónimo de Ayanz y Beaumont [1-3]. Más concretamente, este artículo se centrará en estudiar el molino Ayanz de eje vertical [4]. Los dos molinos de viento fueron privilegios de invención otorgados en este caso por Felipe III durante el año 1606 [1]. Ayanz siguió los pasos de una multitud de inventores que, antes que él, realizaron una incontable cantidad de invenciones y patentes a lo largo de más de un siglo. De hecho, todavía hoy no se han recuperado todas por los historiadores e investigadores [1-3]. En este contexto, Ayanz nace en Gendulain, en el año 1553 en el seno de una familia noble. Ayanz se dedicó a la carrera militar, participando en multitud de batallas, y sabe que, ya en 1606, obtuvo la patente para la explotación de más de cincuenta invenciones [1-3]. Los inventos que realizó y que quizás sean más conocidos fueron: un sistema de desagüe mediante un sifón, una bomba para desaguar barcos, un precedente del submarino, un horno para destilar agua marina, balanzas de precisión, ingenios para los molinos, bombas para el riego, un mecanismo de transformación del movimiento que permite medir el denominado 'par motor', es decir, la eficiencia técnica, algo que solo siglo y pico después iba a volver a abordarse, un traje de buceo y diferentes variantes de 'máquinas de vapor' [1-3].

| | | |
|--|--|----------------------------------|
|  Ingeniería e Industria | CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA | Tecnología energética |
| ARTICULO INVESTIGACION | Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad | 3322.02 Generación de energía |

19 Los molinos de viento inventados por Ayanz no han sido hasta la fecha destacados de manera especial, sin embargo, en este
 20 documento se pretende profundizar algo más de lo estudiado hasta día de hoy sobre el molino de viento Ayanz de eje vertical. Aunque
 21 dicho molino no fuese ideado en su época para generar energía eléctrica a partir del viento, se ha observado que podría ser una
 22 tipología de turbina eólica atractiva para tal fin, sobre todo en ubicaciones donde el viento incide con baja intensidad y de manera
 23 intermitente [2]. Por ello, el presente artículo trata de cuantificar mediante experimentación la potencia eléctrica extraíble de dicho
 24 molino de viento. A su vez, se pretende comparar el molino Ayanz con las turbinas eólicas más cercanas a él en cuanto a
 25 características morfológicas. Para realizar la caracterización experimental del molino, se seguirá la teoría aerodinámica de palas
 26 estándar enunciada inicialmente por Betz hace aproximadamente un siglo [5] y que hasta la fecha ya ha sido desarrollada y
 27 completada por otros muchos autores y recopilada en libros de referencia tales como [6-8]. El objetivo principal de dicha
 28 caracterización es la obtención de las curvas de potencia generada por el molino en régimen permanente, en función de la velocidad
 29 de viento que incide sobre el molino y de la velocidad de rotación del mismo. Una vez obtenidas dichas curvas características, se
 30 pretende comparar con la turbina eólica Savonius.



a) Molino de Ayanz sin deflector b) Molino de Ayanz con deflector c) Turbina Savonius



d) Túnel de viento en el laboratorio

31 **Figura 1 – Prototipos de turbinas eólicas empleadas en los ensayos y túnel del viento**

32 Para ello, se dispone de un prototipo de molino de Ayanz (con y sin deflector), una turbina Savonius y un laboratorio de túnel de
 33 viento para poder testarlos [9-10]. El deflector es un dispositivo que se coloca entre el origen de viento y la turbina impidiendo que

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p style="text-align: center;">ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p style="text-align: center;">Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p style="text-align: center;">3322.02 Generación de energía</p> |

34 se produzcan fuerzas que se oponen al giro de la turbina [11]. La Figura 1 muestra todos estos prototipos, contruidos con las mismas
35 dimensiones para poder realizar una comparación bajo mismas condiciones.

36 Los tres prototipos se han diseñado de tal forma que presenten una misma área del corte transversal del volumen cilíndrico barrido
37 por las aspas al girar.. Tal y como se enuncia en las patentes originarias de ambos molinos [11]-[12], en el caso de los prototipos
38 Ayanz, el número de aspas es seis, mientras que en el caso del prototipo Savonius el número de aspas es dos. De esta manera, se
39 puede deducir que la suma del área de material requerido para realizar cada prototipo es diferente, siendo el Savonius el que menos
40 cantidad de material requiere.

41 En cuanto al deflector se refiere, este gira por medio de unas ruedas, a través de toda la estructura cilíndrica sustentada por seis
42 pilares. El mecanismo de orientación a la dirección del viento se basa en una veleta que está unida fijamente al deflector tal y como
43 se muestra en la Figura 1-b. De esta manera, la veleta se orienta a la dirección del viento y arrastra consigo mismo al deflector,
44 tapando del viento la parte convexa de las aspas del molino. Con la intención de que sirva de ayuda, en el video [8] se muestra el
45 funcionamiento del prototipo desarrollado.

46 A continuación, de una manera más general, se cuantificará el potencial de generación eléctrica del molino Ayanz de eje vertical
47 en condiciones de viento típicos de la mini-eólica en el mismo túnel de viento (ver Figura 1-d), y se comparará con los resultados del
48 Savonius. El objetivo es estudiar la idoneidad del molino de Ayanz para ser utilizado como generador eólico dentro del rango de
49 potencias de la mini-eólica, que es una aplicabilidad que suscita bastante interés en la actualidad [13-16].

50 Finalmente, con el objetivo tanto de simplificar la instalación como de reducir los costes y las pérdidas que se producen en la
51 electrónica del control, se plantean dos alternativas al control clásico implementado en un microprocesador. Por una parte, un control
52 MPPT analógico realizado mediante componentes pasivos y amplificadores operacionales alineado con el concepto *open access*. Y,
53 por otra parte, una propuesta low-cost totalmente libre de convertidor, sensores y control activo.

54

55 **2.- COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS TURBINAS**

56 En el ANEXO A se explican con detalle los procesos de caracterización del túnel de viento y el generador empleado. Tras realizar
57 esto, se han testado las tres turbinas eólicas: Ayanz sin deflector, Ayanz con deflector y Savonius. El circuito eléctrico para el de
58 testeo es el mostrado en la Figura 2. Mediante el túnel de viento, se logra un viento de velocidad variable programable por el usuario,
59 que incide sobre la turbina y hace que esta gire.

60 En primer lugar, se realizarán algunos test a velocidad de viento constante para caracterizar el potencial generador de las turbinas
61 eólicas, y en segundo lugar, se testearán las dos mejores candidatas en condiciones de velocidad de viento variable.

62 **2.1- ENSAYOS SIN ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA**

63 El procedimiento de los ensayos es el siguiente. El generador, común para todas las turbinas eólicas, se acopla de forma directa
64 (sin reductora) en el eje de rotación y se conectan unas resistencias variables en las bornas del estator (ver Figura 2). Variando el
65 valor de las resistencias es posible conseguir que, a una velocidad de viento dada, la turbina de viento genere diferentes potencias.

66 Conociendo la resistencia R de la carga variable y midiendo la tensión V y la corriente I , se obtiene la potencia P trifásica que
67 disipa la carga. A esto se le suma las perdidas resistivas del generador y se obtiene la potencia absorbida por la turbina eólica
68 (despreciando pérdidas mecánicas e inductivas). Así, para el cálculo se opta por $P = \frac{3}{2} \frac{V^2}{R}$ debido a que la medida de corriente
69 presenta ruido eléctrico y se quiere realizar de la forma más precisa posible.

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p>ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p>Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p>3322.02 Generación de energía</p> |

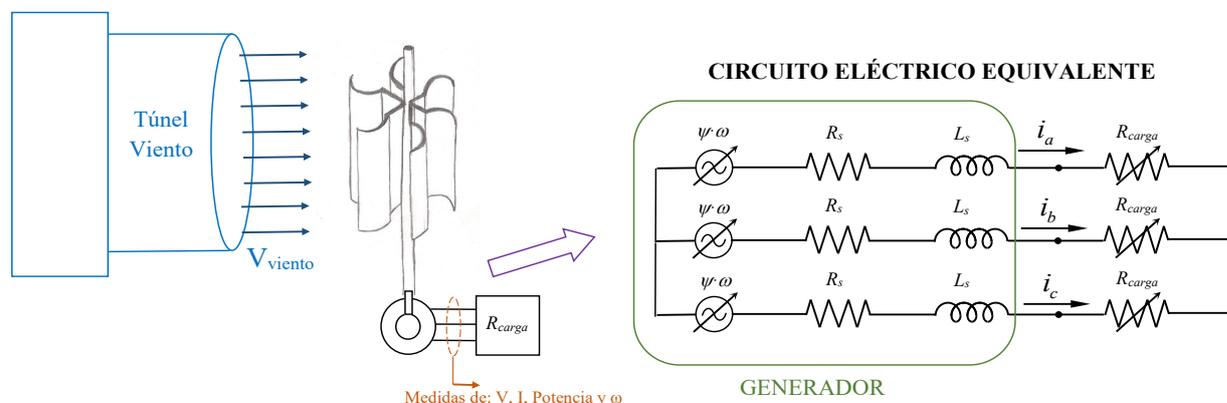


Figura 2 – Esquema del ensayo a viento constante.

70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92

Para una mejor comprensión de los resultados y así poder obtener unas conclusiones más amplias, se expone en el ANEXO B un análisis matemático del funcionamiento de las turbinas eólicas. Tras esto, se analizan los resultados de los ensayos.

En la Figura 3 se recopilan todos los resultados por separado. Podemos observar cómo para diferentes velocidades de viento v_w , el pico de potencia se produce a diferentes velocidades de giro, ya que a medida que aumenta v_w , la turbina debe girar más rápido para aprovechar la potencia disponible. A su vez, se muestran los resultados de C_p respecto a λ , junto a la curva polinómica de tercer grado que indica el comportamiento teórico.

En resumen, el molino de Ayanz con deflector muestra unos resultados significativamente mejores que la versión sin deflector. Sin embargo, el valor máximo de C_p se ha conseguido con la turbina Savonius, $C_p = 0.105$, pudiéndose extraer una mayor cantidad de energía para una v_w dada, aspecto muy relevante.

No obstante, el C_p máximo para el caso del molino de Ayanz con deflector es próximo al valor del Savonius, dándose a un valor menor de λ . Esto implica que, para dos turbinas del mismo radio y a misma v_w la velocidad de giro es menor. Así, se consigue reducir el estrés mecánico de las aspas y minimizar la contaminación acústica.

Todo esto se sintetiza en los resultados de la Figura 4, que proviene de extraer los picos de potencia de la Figura 3-a-c-e. Se observa que la potencia generada a una misma v_w por el molino de Ayanz con deflector es tan solo ligeramente inferior a la generada por el Savonius, con la diferencia de que se produce a una velocidad de rotación menor.

También es remarcable, que tal y como se observa en la Figura 3-a-c-e, la curva de potencia-velocidad del Savonius presenta una zona plana ligeramente mayor a potencias altas. Esto puede considerarse como una ventaja, ya que, ante vientos variables o turbulentos, si no se consigue que el molino trabaje a la velocidad de giro óptima, pero sí a una cercana, el decremento en la potencia generada será ligeramente menor que en los prototipos Ayanz.

A vista de los resultados obtenidos en la caracterización a velocidad de viento constante, y dado que el C_p del molino de Ayanz sin deflector es menor, se ha decidido continuar con el análisis obviando esta configuración de turbina eólica.

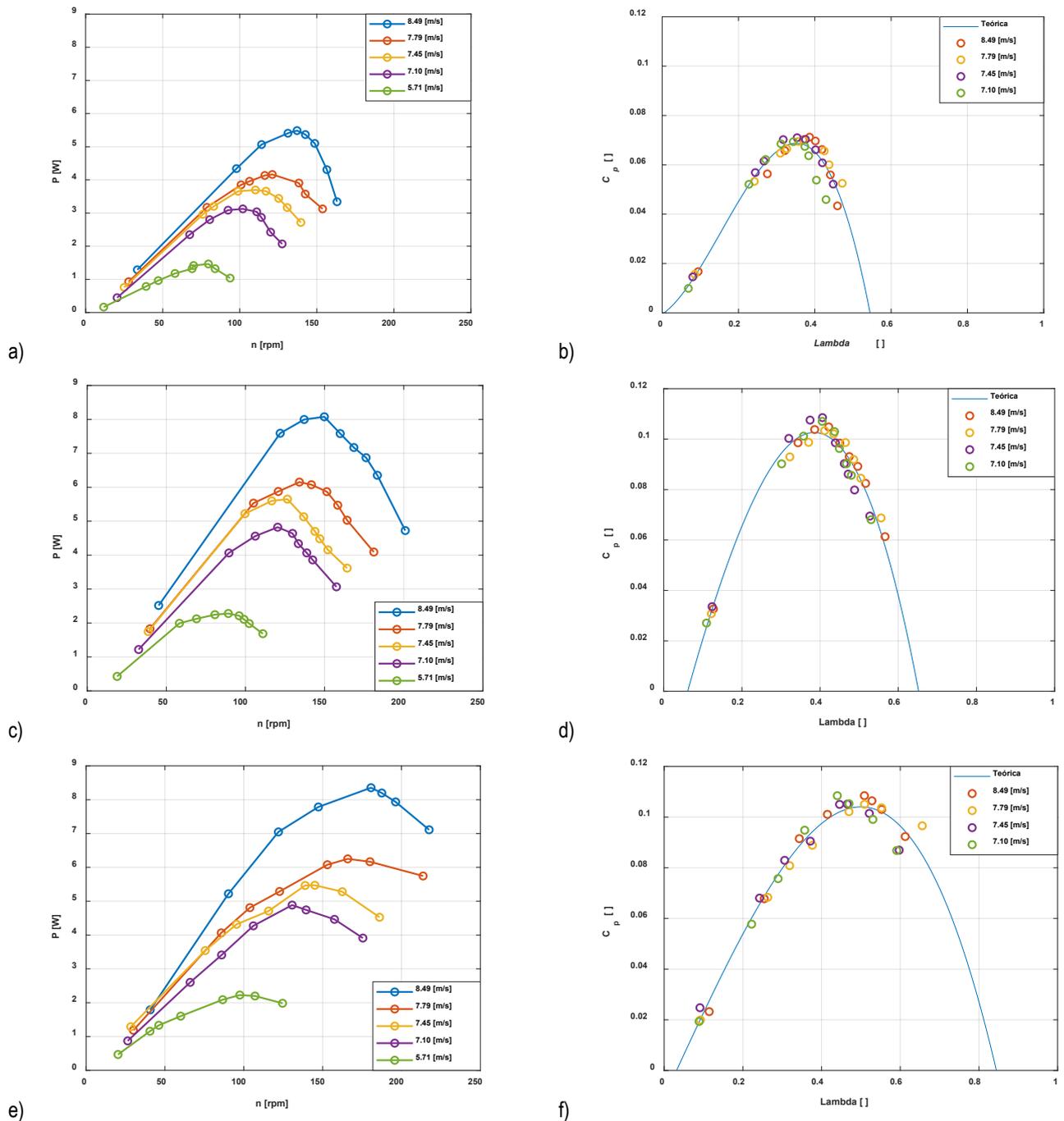
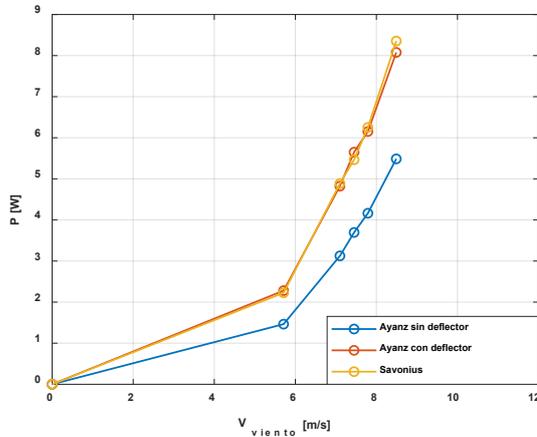


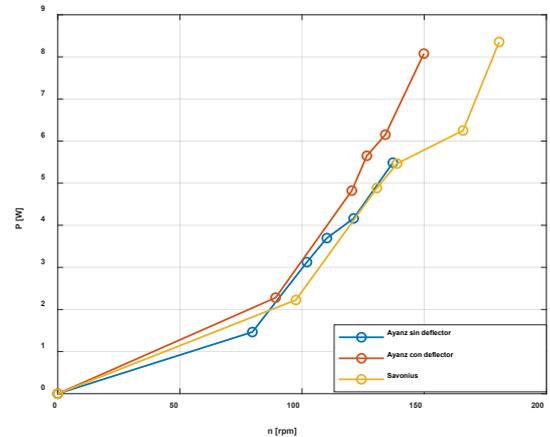
Figura 3 – Resultados a viento constante de la potencia en función de velocidad mecánica y Cp en función de Lambda para el molino de Ayanz sin deflector (a y b), con deflector (c y d) y turbina Savonius (e y f)

93
94
95
96

| | | |
|--|--|---|
|  Ingeniería e Industria | CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA | Tecnología energética |
| | ARTICULO INVESTIGACION | Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad |



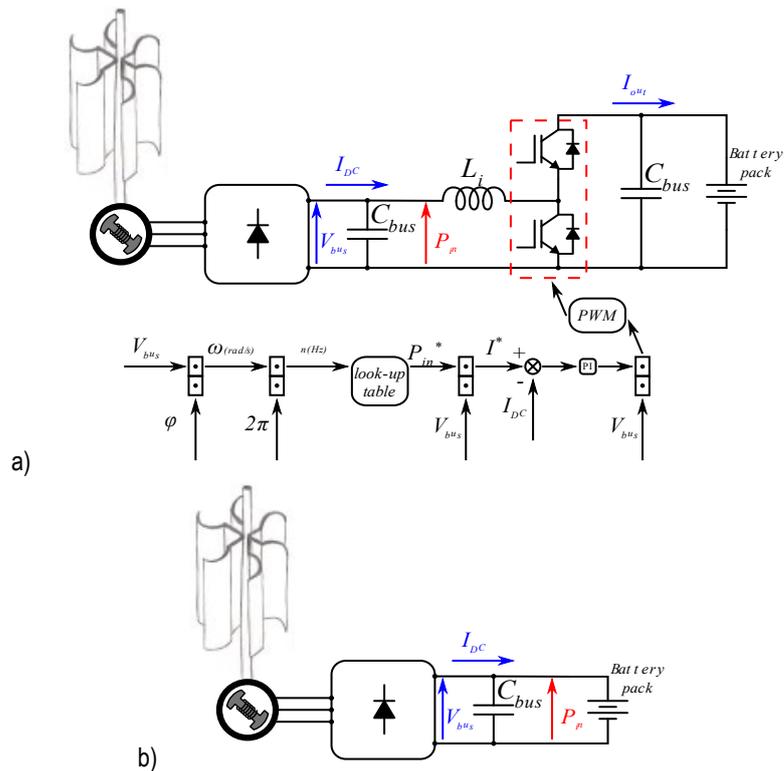
a) Potencia generada respecto a velocidad de viento



b) Potencia generada respecto a velocidad de giro

97

Figura 4– Curvas de MPPT de las tres turbinas eólicas



98

99

Figura 5 – Circuito de potencia y esquema MPPT empleados (a) y esquema de la proposición de bajo coste (b)

100

2.2- ENSAYOS CON ALGORITMO DE EXTRANCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA

101

Los ensayos a v_w variable se han realizado en la misma bancada del apartado anterior, pero con la diferencia de disponer de un convertidor de potencia genérico con topología *buck-boost* a la salida del generador (ver Figura 5-a) en lugar de las resistencias

102

| | | |
|--|--|----------------------------------|
|  Ingeniería e Industria | CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA | Tecnología energética |
| ARTICULO INVESTIGACION | Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad | 3322.02 Generación de energía |

103 variables. Todo el sistema está conectado a un dispositivo de prototipado rápido dSpace DS1103 donde se implementan, tanto el
104 control del variador del túnel de viento con los distintos perfiles de viento, como los algoritmos de control de las turbinas eólicas.
105 Disponiendo a la salida del convertidor dos baterías de 12 V en serie Xunzel de modelo SOLARX-30.

106 A partir de los puntos de máxima potencia obtenidos en los ensayos a v_w constantes, se decide usar un control MPPT en ambas
107 turbinas eólicas. Esta decisión se justifica en que, por una parte, es un control fácilmente implementable en ambas turbinas y, por otra
108 parte, al hacer trabajar las turbinas en su punto óptimo de potencia para cada v_w , puede determinarse de forma clara el rendimiento
109 de ambas ante condiciones de viento variable.

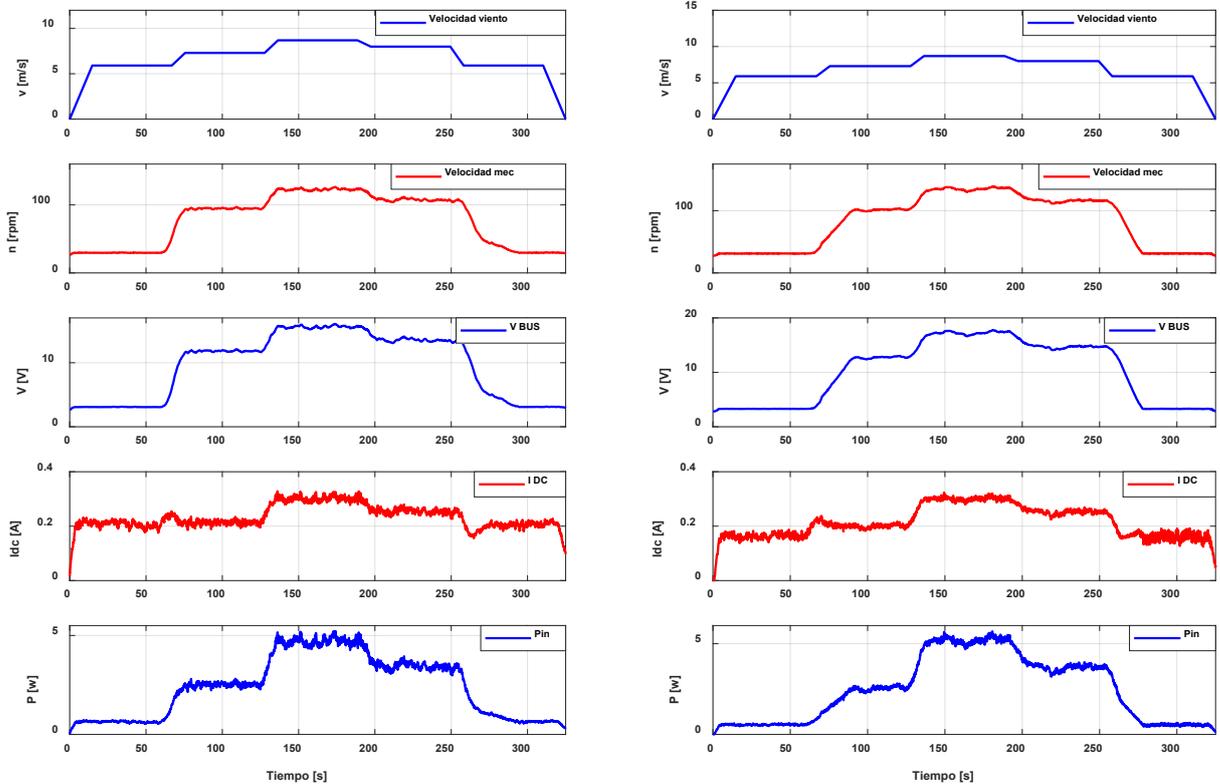
110 El generador se conecta a un puente rectificador a diodos trifásico y la energía generada carga el condensador de bus del
111 convertidor *buck-boost*. La consigna de entrada del control del convertidor es la tensión de bus v_{In} , ya que ésta variará en función
112 de la velocidad de giro γ , por tanto, de la v_w . La consigna se divide entre el flujo φ del generador y se obtienen las consignas de
113 velocidad angular ω y mecánica n de giro del generador. Mediante esta última consigna y la curva MPPT de la Figura 4-b para cada
114 una de las turbinas eólicas, se obtiene la consigna de potencia P^* , la cual se utiliza para generar la consigna de lazo de corriente I^* .
115 Este lazo compara I^* con la corriente DC de entrada I_{DC} , de forma que reduce el error a cero mediante un controlador PI. La salida
116 de corriente que proporciona el PI es dividida entre la tensión de bus V_{bus} y, finalmente, se consiguen los ciclos de trabajo
117 correspondientes del MOSFET del convertidor. Queda mencionar que, aunque el convertidor sea un *buck-boost*, este se usará como
118 un elevador al uso, es decir, se usará activamente el MOSFET inferior y el diodo pasivo del superior.

119 Para el ensayo se ha definido un perfil de viento que cuenta con 5 intervalos para velocidad de 5.9, 7.29, 8.68, 8 y 6 m/s y distintos
120 niveles de rampa.

121 Como ya se ha mencionado, debe tenerse en cuenta que la turbina de Savonius tiene un coeficiente λ mayor, implicando que para
122 una misma v_w y un mismo radio, la velocidad de giro es mayor. Esto se aprecia en las curvas de velocidad mecánica de la Figura 6,
123 ya que la Savonius alcanza una velocidad de giro máxima de 137.8 rpm frente a los 123.6 rpm de la Ayanz. En cuanto a potencia
124 generada, la turbina Savonius es la que presenta el mayor pico a v_w de ensayo máxima, 5.52 W de la Savonius frente a los 5.13 W
125 de la Ayanz con reflector.

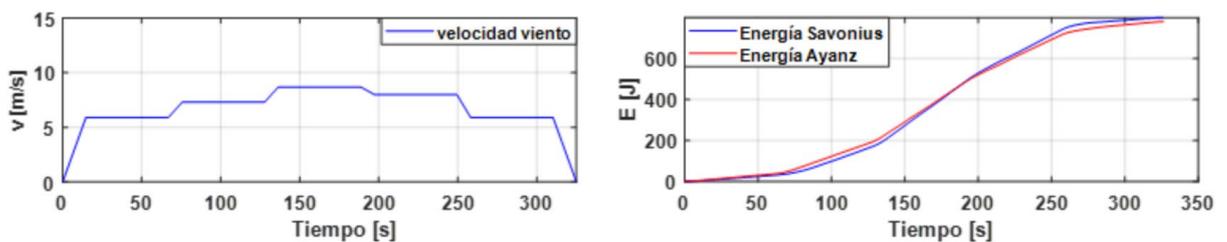
126 Además, se ha calculado el perfil temporal de energía generada a lo largo de todo el ensayo. Analizando la Figura 6-c podemos
127 concluir que la turbina Savonius presenta un mejor comportamiento, generando una mayor cantidad de energía total (799.33 J frente
128 a los 780.01 J de la Ayanz con deflector) y presentando un mejor comportamiento a v_w mayores. Sin embargo, cabe destacar que el
129 molino de Ayanz con deflector presenta un mejor comportamiento que la Savonius a bajas v_w .

130



a) Molino de Ayanz con deflector

b) Turbina Savonius



c) Perfil de viento y energía total extraída

Figura 6 – Resultados de los ensayos a velocidad de viento variable

131
132

133 3.- ALTERNATIVAS DE BAJO CONSUMO Y BAJO COSTES PARA LA ELECTRÓNICA ASOCIADA

134 A la vista de la baja potencia de generación mostrada, y teniendo en cuenta que la electrónica de control y el convertidor de
135 potencia tendrán unos consumos/pérdidas que pueden minar la generación, se considera necesario simplificar la electrónica asociada
136 para conseguir un mayor aprovechamiento de los recursos. En este apartado se plantean dos alternativas:

- 137 • Control MPPT analógico. Eliminando de esta forma la necesidad de utilizar un microcontrolador y las sondas de medición,

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p style="text-align: center;">ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p style="text-align: center;">Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p style="text-align: center;">3322.02 Generación de energía</p> |

- 138 y permitiendo un control e implementación más simples y accesible (*open access*) para usuarios no expertos.
- 139 • Esquema de bajo coste. Se propone una configuración en la que se prescinde tanto del control como del convertidor de
- 140 potencia, conectando la batería directamente al generador mediante un puente rectificado.

141 3.1- CONTROL MPPT ANALÓGICO

142 Se ha estimado que el consumo de la electrónica asociada oscila entre los 40-60 mW, no es excesivo pero sí que supone una gran

143 inversión para la potencia máxima generada medida de algo más de 5 W. Incluso cambiando a una plataforma más pequeña y

144 comercial, como una LAUNCHXL-F28379D de Texas Instruments, quedaría excesivo en estas circunstancias al mantener el hándicap

145 de la programación del control y puesta en marcha.

146 Como alternativa con una implementación más simple, se ha diseñado un circuito totalmente analógico que actúa como control

147 MPPT y elimina tanto la necesidad de un microprocesador como de la sensorización. Esta solución se presenta en el ANEXO C, y se

148 ha diseñado de tal manera que pueda adaptarse a distintas turbinas eólicas y convertidores de potencia con solo cambiar los valores

149 de algunos de sus componentes.

150 3.2- BAJO COSTE

151 Se ha optado por la opción más sencilla (ver Figura 5-b): conectar la batería directamente al generador mediante un puente

152 rectificador. A continuación, se describe el funcionamiento del conjunto.

153 Considerando el generador como una fuente ideal de tensión, la turbina eólica presentaría una velocidad de giro mecánica

154 constante, ya que a la salida del rectificador se está imponiendo la tensión de la batería, la cual se considera fija. Esto implicaría un

155 funcionamiento totalmente fuera de la curva de MPPT.

156 Sin embargo, teniendo en cuenta que el generador presenta una resistencia e inductancia internas, la fuerza electromotriz del

157 generador será igual a la suma de la tensión de la batería y la caída de tensión en la impedancia mencionada, por lo que el

158 comportamiento descrito se ve ligeramente modificado. Por ejemplo, según vaya aumentando la v_w incidente, la turbina eólica se

159 acelerará produciéndose un incremento de la fuerza electromotriz debido al aumento en la caída de tensión en la impedancia interna,

160 siendo la diferencia entre ambas siempre igual a la tensión fija de la batería. Es decir, la variación de tensión producida en la

161 impedancia interna permite aumentar la ω de la turbina eólica.

162 De esta forma, la tensión de la batería impone un límite inferior a la velocidad de giro, por debajo de la cual no se generará energía

163 alguna, por lo que ésta debe ajustarse en función de la v_w predominante a lo largo del día. Para mejorar este aspecto, se podría

164 modificar la configuración serie-paralelo de los módulos que formen el *battery pack* empleado para conseguir diferentes niveles de

165 tensión y, por consiguiente, tanto diferentes tensiones mínimas a las que se comenzaría a generar energía como diferentes curvas

166 de funcionamiento.

167 Teniendo presente todo lo mencionado, puede decirse que el funcionamiento del sistema propuesto se aproxima a un control

168 MPPT con su curva asociada (ver Figura 7-a).

169 El sistema propuesto se ha validado con el molino de Ayanz con deflector y la turbina Savonius, y para los ensayos se ha empleado

170 el mismo perfil de v_w variable utilizada con anterioridad.

171 Los resultados (ver Figura 7-b-c) muestran una menor velocidad de giro y menor potencia generada con respecto a los ensayos

172 mediante control MPPT (ver Figura 6-a-b), debido a que ambos factores están íntimamente relacionados con la tensión de batería.

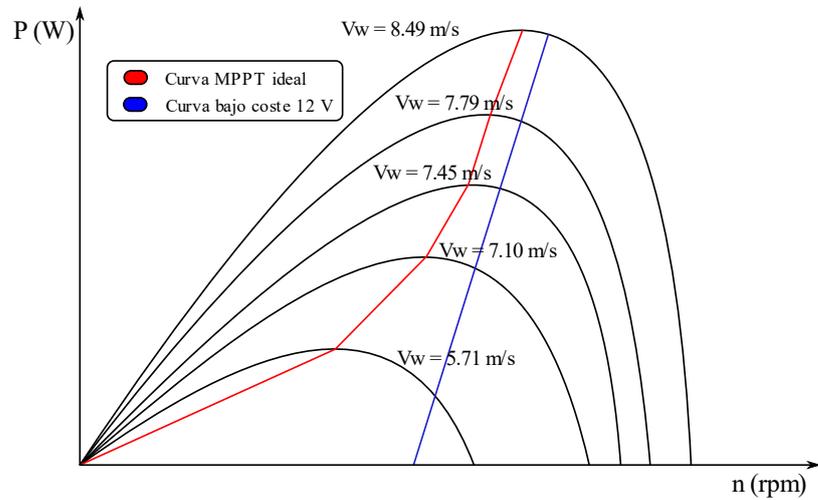
173 En general, se repite el mismo patrón que con control y convertidor, se aprecia un rendimiento ligeramente mejor en la turbina

174 Savonius con respecto a la Ayanz con deflector. Sin embargo, puede decirse que las diferencias son mínimas. La Figura 8 nos muestra

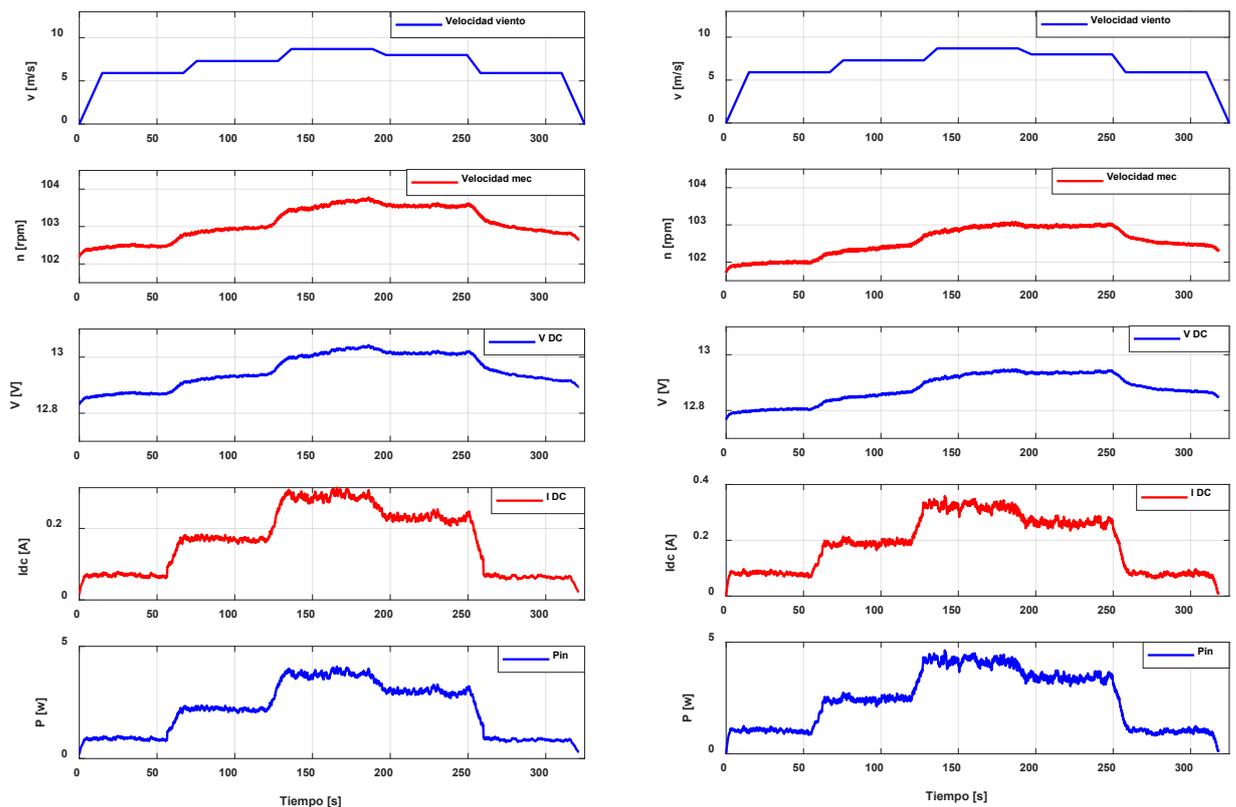
175 una comparación de ambos casos respecto a sus homólogos con control y convertidor, se ve claramente una significativa reducción

176 de en torno a un 20% en la potencia máxima generada en ambas turbinas. Sin embargo, queda valorar si esta reducción es asumible

177 junto a la reducción en costes.



a) Potencia en función de la velocidad mecánica



b) Molino de Ayanz con deflector

c) Turbina Savonius

Figura 7 – Planteamiento (a) y resultados de los ensayos con el sistema de bajo coste (b y c)

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p style="text-align: center;">ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p style="text-align: center;">Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p style="text-align: center;">3322.02 Generación de energía</p> |

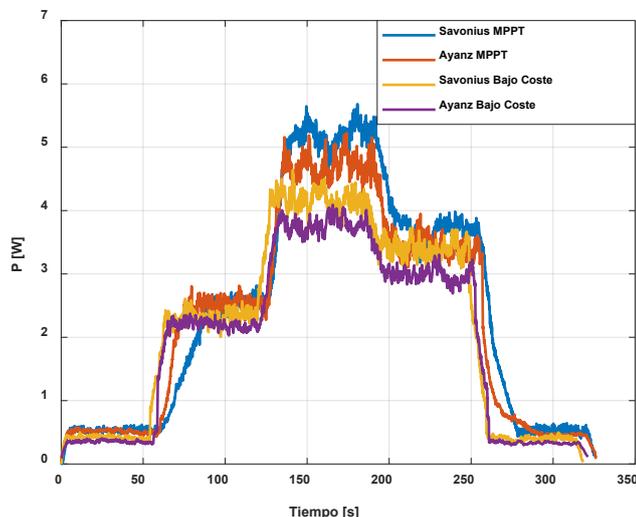


Figura 8 – Potencia obtenida mediante el control MPPT y la configuración de bajo coste para ambas turbinas

179
180

4.- CONCLUSIONES

181

182 En primer lugar, los resultados expuestos demuestran que una turbina eólica tan antigua como el molino de Ayanz con deflector
183 es comparable en cuanto a potencial de generación eléctrica con una turbina más actual como la Savonius. En la Figura 4 se observa
184 la mejora que supone el uso del deflector en el molino de Ayanz, implicando un incremento de la generación mayor según aumenta
185 la velocidad del viento, hasta casi igualar lo generado por la turbina Savonius. Por otro lado, se observa también (ver Figura 3) que,
186 para un mismo radio de turbina y misma velocidad de viento, el punto óptimo de funcionamiento del molino de Ayanz corresponde a
187 velocidades de giro menores, implicando un menor estrés mecánico en toda la estructura y una menor contaminación acústica.

188 En cuanto a los ensayos con viento variable y control MPPT, se observa que la potencia generada a vientos específicos concuerda
189 con los valores obtenidos en la caracterización estática. No obstante, el empleo de este algoritmo presenta varias desventajas entre
190 las que destacan una mayor complejidad del sistema (sensorización, implementación del microcontrolador, etc.) y las pérdidas
191 asociadas a la electrónica asociada. Al manejarse en la mini-eólica potencias tan reducidas de generación, las pérdidas en el
192 convertidor son de un orden de magnitud más pequeñas y comienzan a ser muy relevantes. Por ejemplo, se estima que en la
193 inductancia del convertidor *buck-boost* empleado las pérdidas por efecto Joule son de 0.5 W frente a los 5.52 W generados en el caso
194 de la turbina Savonius.

195 Por otro lado, al tratarse de turbinas eólicas de dimensiones tan reducidas, son más susceptibles ante variaciones de la velocidad
196 de viento. Eso implica una dificultad añadida para el algoritmo MPPT, ya que estas fluctuaciones evitan que se trabaje durante
197 periodos de tiempo prolongados en la curva MPPT, perjudicando el rendimiento total del sistema.

198 Dicho esto, se ve necesario profundizar en métodos de control más simples y eficientes a pequeñas escalas de generación, como
199 pueden ser el sistema de control analógico o la alternativa de bajo coste sin control ni convertidor planteados.

200 Respecto al planteamiento de bajo coste, un punto clave en su diseño es el adecuado dimensionamiento de la tensión de la batería
201 con respecto a las características del generador. Ya que solo se extraerá energía cuando la turbina eólica genere una tensión superior
202 al umbral impuesto por la batería, y a que el máximo rendimiento se obtendrá cuando la potencia en funcionamiento de la frecuencia
203 sea lo más cercano posible a la curva MPPT (ver Figura 7-a).

204 Por último, como corolario, en el ANEXO D se han plasmado algunos pensamientos respecto al molino de Ayanz con el objetivo
205 de abrir el debate sobre esta singular turbina eólica y servir, a su vez, como planteamiento para algunas líneas futuras de análisis.

| | | |
|--|---|--|
|  <p>Ingeniería e Industria</p> | <p>CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p>Tecnología energética</p> |
| <p>ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p>Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p>3322.02 Generación de energía</p> |

206

REFERENCIAS

207

[1] N. García Tapia, "Patentes de invención españolas en el siglo de oro," editado por la oficina española de patentes y marcas, España, 1990.

208

[2] G. Abad, M. Penalba y A. Zarketa-Astigarraga, "Molinos de viento patentados por Jerónimo de Ayanz y Beaumont en el año 1606; un análisis conceptual desde una perspectiva ingenieril del año 2021," Mondragon Unibertsitatea, 2021.

209

[3] N. García Tapia, "Jerónimo de Ayanz y Beaumont. Un inventor navarro (1553-1613)," editado por la Universidad Pública de Navarra, 2010.

210

[4] https://es.wikipedia.org/wiki/Molino_de_viento_Ayanz_de_eje_vertical

211

[5] A. Betz, "Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Vandenhoeck and Ruprecht," Gotinga 1926, heute erhältlich als unveränderter Nachdruck, Ökobuch, Staufen.

212

[6] G. Abad, J. López, M. Rodríguez, L. Marroyo, y G. Iwanski. "Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation," New Jersey, John Wiley & Sons, 2011.

213

[7] M. A. Rosato, "Small Wind Turbines for Electricity and Irrigation," CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019.

214

[8] P. Fernández, "Energía eólica," Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T., Santander 1993.

215

[9] Video publicado en Youtube donde se muestra en funcionamiento un prototipo de Molino Ayanz:

216

<https://www.youtube.com/watch?v=HV512NX1bV4&t=3s>.

217

[10] M. Gallo, E. Mola, I. Muguruza, A. Ugartemendia, G. Abad y D. Cabezuelo, "Estado del arte de la energía minieólica analizando diferentes controles," DYNA, Vol. 97, N° 1, 2022.

218

[11] J. C. Sáenz-Diez, "Aeroturbina de eje vertical de arrastre con admisión variable," ES 2391741, Septiembre, 2012.

219

[12] S. J. Savonius, "Rotor adapted to be driven by wind or flowing water," US Patent US1697574, August, 1925.

220

[13] N. R. Maldar, C. Y. Ng y E. Oguz, "A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications," Energy Conversion and Management, Vol. 226, 2020.

221

[14] O. Garcia, A. Ulazia, M. del Rio, S. Carreno-Madinabeitia y A. Gonzalez-Arceom, "An Energy Potential Estimation Methodology and Novel Prototype Design for Building-Integrated Wind Turbines," *Energies* 2019.

222

[15] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrāja y V. HariKrishna, "A review on small scale wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, 2016.

223

[16] J. G. Njiri y D. Söffker, "State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, 2016.

224

225

226

227

228

229

230

231

232

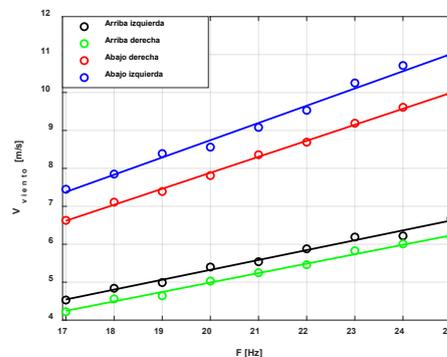
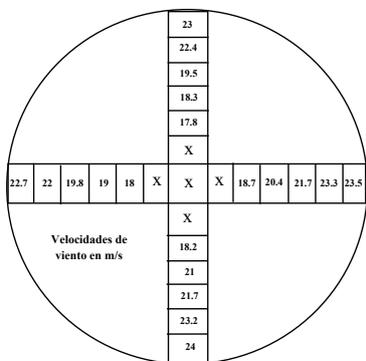
233

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p>ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p>Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p>3322.02 Generación de energía</p> |

234 **ANEXO A - CARACTERIZACIÓN DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL**

235 **A.1 – TÚNEL DE VIENTO**

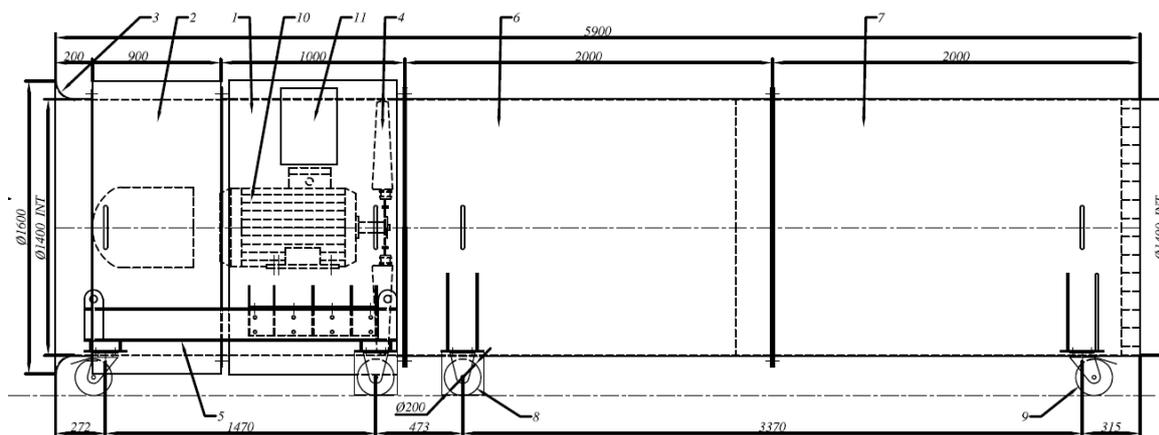
236 A continuación, se explicará el proceso que se ha llevado a cabo para caracterizar el viento proporcionado por el túnel de viento
 237 o “gran ventilador”. Se trata de un túnel de aire turbulento que consta de un único ventilador, traccionado directamente por un único
 238 motor de inducción de 400V, 50Hz y 30kW y cuatro polos. Dicho motor es controlado por accionamiento comercial de ABB ACS550.
 239 A la velocidad nominal del motor, se obtiene un caudal de aire de 100.000 m³/h. Reduciendo la velocidad del motor mediante el
 240 variador comercial, se obtiene un caudal de aire menor y por tanto una velocidad de viento a la salida del túnel menor. Justo detrás
 241 del motor, el túnel dispone un silenciador, mientras que en la salida tiene mientras que en la salida tiene una rejilla uniformizadora del
 242 flujo de aire. Los molinos de viento a testear, se sitúan fuera del túnel a una distancia fija del mismo. En la Figura 9-d pueden apreciarse
 243 las características geométricas del túnel, habiendo sido diseñado y construido por ISOVENT-NLH.



a) Velocidad de viento a la salida del túnel en diferentes puntos a la velocidad nominal del variador (50Hz).

b) Molino de Ayanz con deflector

c) Resultados de la caracterización



d) Características geométricas del túnel de viento

Figura 9 – Características del túnel de viento y de los ensayos realizados en su caracterización

244
245

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p style="text-align: center;">ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p style="text-align: center;">Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p style="text-align: center;">3322.02 Generación de energía</p> |

246 Nótese que el túnel de viento de que se dispone no logra una velocidad de viento constante en los diferentes puntos a su salida
247 (Figura 9-a). A lo largo del radio de la superficie de salida, la velocidad de viento disminuye. En la zona central del área de salida del
248 túnel, la velocidad de viento cae en gran medida. Los molinos testeados se han localizado en la parte baja del túnel, tal y como
249 muestra la Figura 9-b, con el objetivo de evitar los vientos generados en la parte central del túnel, por un lado. Por otro lado también,
250 al estar los prototipos de molinos cerca del suelo, se facilita el montaje y la colocación de deflectores, frente a prototipos que pudieran
251 ponerse a alturas más elevadas. Por último, para realizar un análisis más preciso, se ha decidido medir la velocidad del viento en los
252 cuatro extremos del área con la que el viento incide en la turbina. En la Figura 9-c se muestran los diferentes puntos (puntos rojos)
253 en los que se han realizado las medidas.

254 Las mediciones del viento en los puntos mostrados en la Figura 9-c se han realizado mediante un sensor XA1000 Lufft. Se trata
255 de un sensor portable, que se ubica en diferentes puntos de salida del túnel (puntos señalizados en rojo en la Figura 9-b). El sensor
256 empleado, se trata de un anemómetro de 'hilo caliente' cuya precisión es de 0.2m/s y su fondo de escala son 20m/s. El ensayo
257 consiste en imponer una consigna de frecuencia de trabajo al accionamiento del túnel de viento y realizar una medición de la velocidad
258 del viento en los puntos mencionados. Para cada punto y consigna de frecuencia, se ha realizado una medición en una ventana de
259 tiempo de 1 minuto y se han promediado las velocidades obtenidas durante este intervalo.

260 En la Figura 9-b se puede observar los resultados obtenidos de las medidas anteriores. Analizando los resultados se observa que
261 la velocidad de viento es mayor en los puntos inferiores de la turbina, ya que estos se encuentran a mayor distancia del centro del
262 túnel comportándose el fluido (aire en movimiento) de una forma menos turbulenta.

263 Se aprecia a su vez, sin importar el punto de medición, que existe una relación lineal entre la velocidad de viento y la consigna de
264 frecuencia, ya que las curvas mostradas pueden aproximarse a una ecuación de primer grado. Se ha aprovechado este
265 comportamiento, predecible y modelable matemáticamente, para realizar experimentos a viento variable usando perfiles de viento
266 reales de los montes circundantes. Cada una de las ecuaciones de primer grado se ha definido de la siguiente forma: primero,
267 calculando la pendiente para cada uno de los puntos de medición; y después, definiendo como pendiente de la ecuación de primer
268 grado la media de las pendientes calculadas para los diferentes puntos de medición.

269

270 **A.2 – GENERADOR EMPLEADO**

271 Para poder evaluar en igual de condiciones las tres turbinas, se ha empleado el mismo generador síncrono de imanes
272 permanentes, o PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) por sus siglas en inglés, en todos los ensayos. Se trata de un
273 generador síncrono trifásico, con imanes de *NdFeB* interiores (con saliencia), 200 W de potencia nominal y 24 V de tensión nominal
274 en AC. A continuación, se expone la metodología empleada para la caracterización del generador en caso de no disponer de los
275 datos básicos del generador:

- 276 1. Número de pares de polos. Para determinarlo se ha realizado una medición de tensión entre dos de los tres terminales
277 en vacío del generador durante una vuelta mecánica entera del rotor. En la Figura 10 se pueden observar claramente
278 8 periodos de tensión, indicando que el generador empleado cuenta con 8 pares de polos.
- 279 2. Flujo magnético φ . Se ha realizado un ensayo en vacío girando el rotor del generador a una velocidad angular fija ω
280 y se ha medido la tensión en bornas V_{ph} , repitiendo el procedimiento para diferentes ω y así poder calcular sus
281 respectivos φ (ver Tabla 1):

$$282 \quad \varphi = \frac{V_{ph}}{\omega} \quad (1)$$

- 283
- 284 3. Resistencia de las fases. Para medir la resistencia de cada una de las tres fases se ha utilizado un micrómetro Chauvin
285 Arnoux 6240. El valor medio de cada una de estas es de $R = 2,45 \Omega$.

| | | |
|--|--|----------------------------------|
|  Ingeniería e Industria | CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA | Tecnología energética |
| ARTICULO INVESTIGACION | Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad | 3322.02 Generación de energía |



Figura 10 – Test de pares de polos del PMSG

286
287
288

Tabla 1 – Parámetros utilizados para el cálculo del flujo del generador.

| V_{ph} [V] | ω [rad/s] | φ [Wb] |
|--------------|------------------|----------------|
| 11,6 | 69,36 | 0,096549 |
| 12,4 | 77,22 | 0,09271 |
| 14,2 | 88,718 | 0,092408 |
| 15,46 | 97,138 | 0,09272 |

289

ANEXO B – ANÁLISIS MATEMÁTICO

290

291 Por una parte, hay que mencionar que el potencial de generación dependerá de las dimensiones de la turbina, en concreto del
292 área que se incide frente al viento. Se supondrá que el viento no tiene componente vertical, de esta manera la sección de la turbina
293 se simplifica mediante un rectángulo con base del doble del radio de las aspas y de altura igual a las aspas. La potencia que se podría
294 extraer con una turbina ideal con las mismas dimensiones vendría dada por:

$$P' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 2 \cdot r \cdot h \cdot v_w^3, \quad (2)$$

296

297 donde P' es la potencia de la turbina ideal, ρ es la densidad del aire, r y h son el radio y la altura del aspa respectivamente, y
298 v_w es la velocidad del viento. Para el área de barrido de las palas, en estos aerogeneradores de eje vertical, se emplea la expresión
299 $2 \cdot r \cdot h$, siendo igual para todos; sin embargo, el área útil puede ser considerada de formas diferentes, obteniéndose valores finales
300 diversos.

301 Si llamamos P a la potencia extraída experimentalmente por la turbina, se puede definir el coeficiente de potencia C_p como el
302 cociente entre P' y P :

$$C_p = \frac{P}{P'} = \frac{P}{\rho \cdot r \cdot h \cdot v_w^3} \quad (3)$$

304

305 De esta forma obtenemos un parámetro comparativo independiente del tamaño de la turbina.

306 Por otra parte, con los resultados de los ensayos se han obtenido diferentes curvas de potencia-velocidad mecánica n para
307 diferentes velocidades de viento. Y para eliminar la dependencia de la velocidad del viento, se define un parámetro adimensional λ
308 mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{v_t}{v_w} = \frac{r \cdot \omega}{v_w}, \quad (4)$$

310

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p style="text-align: center;">ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p style="text-align: center;">Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p style="text-align: center;">3322.02 Generación de energía</p> |

311 siendo v_t la velocidad lineal del borde exterior del aspa de la turbina y ω su velocidad de giro angular. De esta forma, al graficar
312 C_p en función de λ se obtiene una curva característica de la turbina que resume gran parte de su funcionamiento. Durante los ensayos
313 solo se han testeado algunos de los puntos de funcionamiento posibles, por lo que, si se desea ajustar estos puntos a una curva
314 teórica, para ello se considera que la fuerza de arrastre de la turbina eólica viene dada por:

$$315 \quad F = \frac{1}{2} \cdot r \cdot h \cdot \rho \cdot (v_w - v_t)^2 \cdot C_d, \quad (2)$$

316 donde C_d es el coeficiente de arrastre. Por lo que, teniendo en cuenta que la potencia es la fuerza de arrastre por v_t y la definición
317 del parámetro λ , se concluye que C_p se puede expresar como ecuación de tercer grado en función de λ :

$$318 \quad C_p = A \cdot \lambda^3 + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda + D \quad (3)$$

324 ANEXO C – ALTERNATIVA ANALÓGICA

325 El circuito analógico diseñado, presenta una funcionalidad equivalente al de un control MPPT. A continuación, se analiza el diseño
326 parte por parte, los parámetros sin definir en las figuras o texto se encuentran en la Tabla 2. A destacar que durante el diseño se ha
327 considerado tener una fuente de 12 Vdc para alimentar la circuitería, lo cual ha condicionado parte de la elección de componentes.
328 Por último, queda mencionar que, aunque el convertidor sea un *buck-boost* (ver Figura 11), éste se usará como un elevador al uso,
329 es decir, se usará activamente el MOSFET inferior S_{wB} y el diodo pasivo del superior D_B .

330 **Tabla 2 – Componentes del circuito analógico de MMPT**

| Dispositivo | Modelo |
|--|--------|
| Operacionales: | |
| $Op_1, Op_2, Op_3, Op_7, Op_8,$ $Op_{10}, Op_{11} \text{ y } Op_{12}$ | LF353 |
| $Op_4, Op_5, Op_6, Op_9, Op_{13},$ $Op_{14} \text{ y } Op_{15}$ | TLC272 |
| Transistores: | |
| Q_1, Q_2 | BC548 |
| Q_3 | BC337 |
| JFET | 2N1819 |
| Diodos y Zener: | |
| $D_1 \text{ y } D_2$ | 1N4148 |
| Dz_1 | 1N4739 |

331
332 Primero de todo, se mide tanto la tensión de bus V_{RM} mediante un puente resistivo en el bus del convertidor *buck-boost* como la
333 corriente de bus reflejada en una resistencia de shunt V_{Rshunt} (ver Figura 11). Tanto las resistencias R_1 y R_2 del puente resistivo y
334 la resistencia de shunt R_{shunt} se dejan a elección libre dependiendo de los niveles que tensión y corriente que se vayan a manejar.

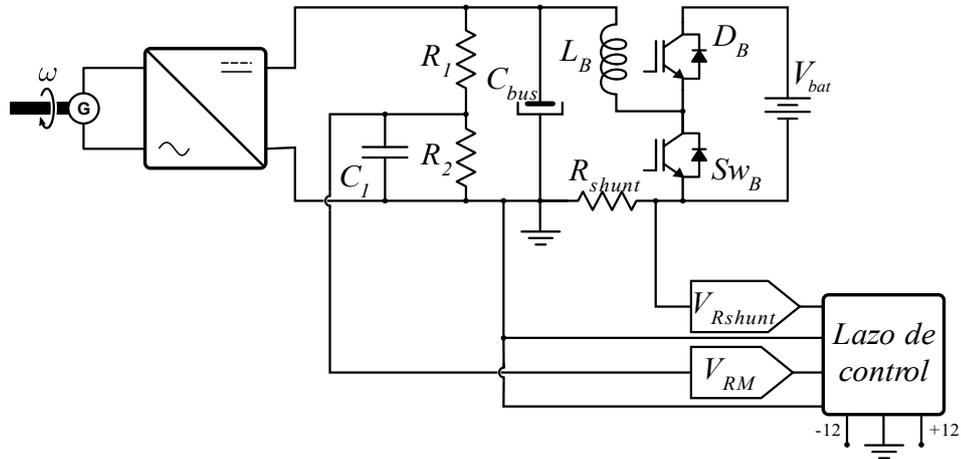


Figura 11 – Esquema general del sistema y los sensores

Para emular la curva de MPPT, se emplea un circuito que acondiciona la señal lineal de V_{RM} a una señal exponencial de corriente de referencia de bus $i_{bus(v)}$ * (ver Figura 12).

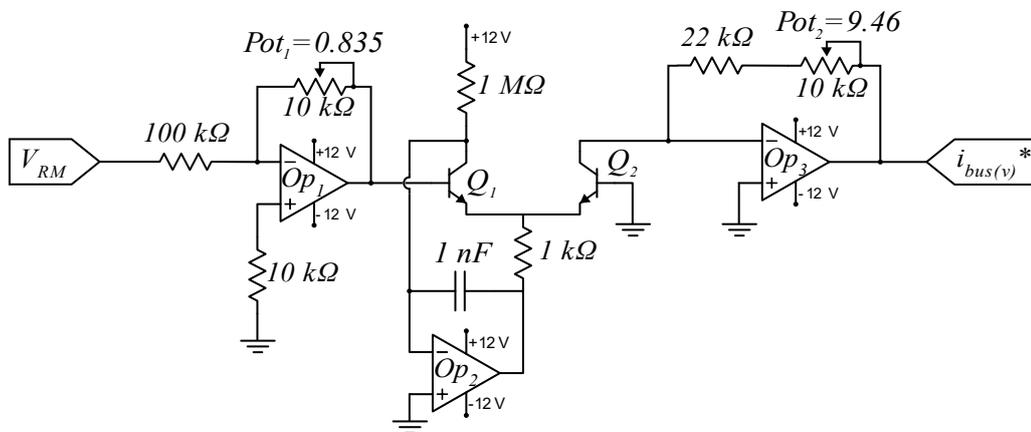


Figura 12 – Acondicionador de tensión lineal a exponencial

335
336
337
338
339
340

341
342

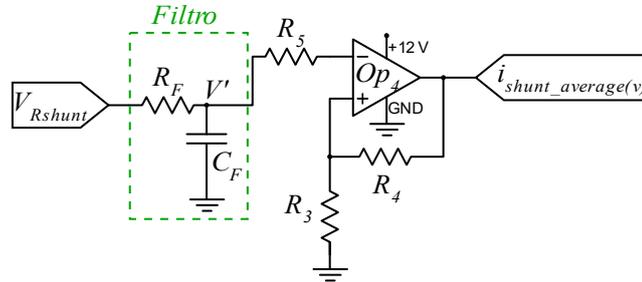


Figura 13 – Filtro paso bajo y acondicionador

La señal de V_{Rshunt} , a su vez, hay que filtrarla y acondicionarla para poder ser usada como señal de corriente de shunt $i_{shunt_average(v)}$ (ver Figura 13). La frecuencia de corte del filtro f_f se establece mediante la resistencia del filtro R_f y el condensador del filtro C_f :

$$f_f = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

(4)

Dependiendo de la resistencia de shunt empleada y el filtro diseñado, se obtendrá una tensión a la salida del filtro V' que deberá acondicionarse mediante un amplificador no inversor para obtener $i_{shunt_average(v)}$:

$$i_{shunt_average(v)} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) V'$$

(5)

Teniendo en cuenta que debe cumplirse:

$$R_5 = \frac{R_4}{R_3}$$

(6)

Una vez acondicionadas las señales de lectura y obtenidas tanto $i_{shunt_average(v)}$ como $i_{bus(v)}^*$, se emplea un circuito de amplificación diferencial para obtener la diferencia entre ambas $i_{error(v)}$ (ver Figura 14).

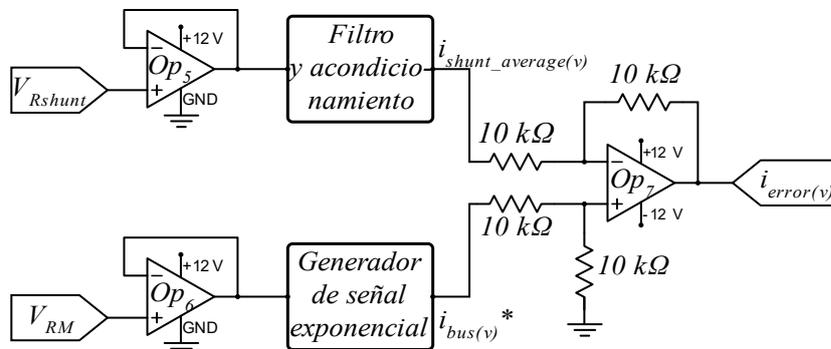


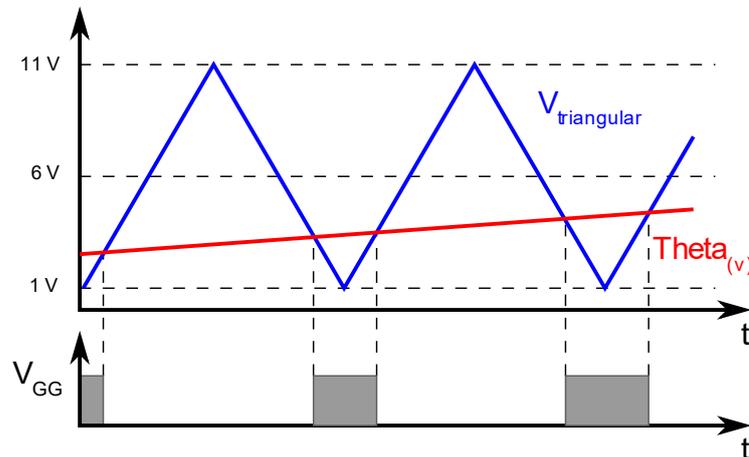
Figura 14 – Lazo de control 1

382

$$5 V = \frac{R_8}{R_9} * 12 V$$

383

(11)

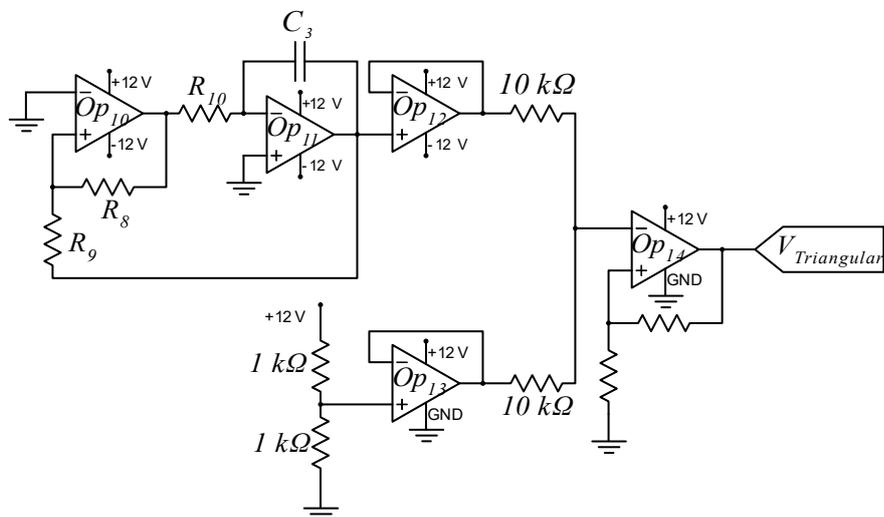


384

385

386

Figura 16 – PWM del control



387

388

389

Figura 17 – Generador de triangular

390 Por último, quedaría el comparador de las señales $\Theta_{(v)}$ y $V_{Triangular}$ para generar las señales de PWM (ver Figura 18). En
391 este particular, la resistencia de puerta $R_g = 4.5 \Omega$ al emplearse un Mosfet IRF320S.

| | | |
|--|---|--|
|  | <p style="text-align: center;">CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA</p> | <p style="text-align: center;">Tecnología energética</p> |
| <p style="text-align: center;">ARTICULO INVESTIGACION</p> | <p style="text-align: center;">Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad</p> | <p style="text-align: center;">3322.02 Generación de energía</p> |

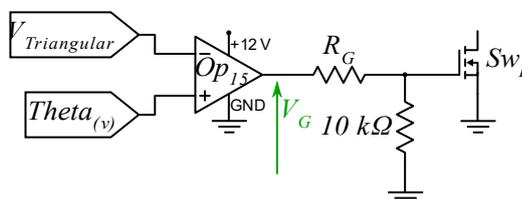


Figura 18 – Comparador del generador PWM

392
393
394

395 ANEXO D – POSIBLES DEBATES ABIERTOS

396 D.1 – SOBRE LA EFECTIVIDAD DEL DEFLECTOR PATENTADO POR AYANZ

397 Un resultado significativo de los ensayos realizados en este artículo es el hecho de que el deflector en forma de obstáculo
398 patentado por Ayanz únicamente es efectivo en el mismo molino sobre el cual lo patentó. Así como en el molino de Ayanz de eje
399 vertical, el deflector consigue efectivamente reducir las fuerzas de frenado del molino en la parte de las aspas convexas, en la otra
400 turbina eólica testeada, la Savonius, no se ha logrado observar este efecto. Nótese que este efecto se ha medido indirectamente,
401 cuantificando el incremento de C_p de una turbina sin deflector a una con deflector. Pues bien, tal y como se ha mostrado en secciones
402 previas, sobre el molino de Ayanz, el deflector consigue incrementar entre un 40-45% el C_p dependiendo del punto de operación. Sin
403 embargo, en la turbina de Savonius, el efecto general observado al introducir el deflector ha sido de reducción de C_p . El dar una
404 explicación razonada y contrastada a este hecho, se encuentra fuera del marco de estudio de este artículo. Sin embargo, estos
405 resultados en gran medida se corroboran en la referencia [6], que ya explicita que los deflectores tal cual aquí se han utilizado, no
406 son efectivos en aeroturbinas Savonius, pero sin embrago, ‘encauzadores’ o ‘incrementadores’ de velocidad de viento sí que lo son.
407 Se deja para futuros análisis el arrojar más luz a este hecho por medio de los desarrollos teóricos y validaciones prácticas
408 correspondientes. También se apunta a otra posible línea de estudio futuro, el evaluar cuanta mejora pueden lograr otro tipo de
409 deflectores, como por ejemplo los propuestos en [11]. Dichos ‘dispositivos deflectores’, que constan de una admisión variable de aire,
410 pueden entenderse como una evolución natural del deflector propuesto por Ayanz, ya que además de buscar reducir las fuerzas
411 opuestas al movimiento de rotación en molinos de eje vertical mediante la obstaculización, también y al mismo tiempo, pueden tener
412 un efecto de mejora del aire incidente en las aspas que producen el movimiento de rotación.

413 D.2 – SOBRE CÓMO SE DEFINE EL C_p EN EL MOLINO DE AYANZ DE EJE VERTICAL

414 Cabe destacar que, durante todos los cálculos llevados a cabo en este artículo para obtener el C_p , se ha hecho uso de la teoría
415 de Betz, enunciada en el año 1926 [5]. En la misma, el C_p de una turbina eólica se calcularía haciendo uso de la expresión (4). Para
416 las dos turbinas eólicas analizadas, el área considerada ha sido el área de corte transversal del volumen cilíndrico barrido por las
417 aspas de la turbina al girar, ya que estamos aplicando en turbinas de eje vertical una teoría muy orientada a describir el
418 comportamiento de turbinas de eje horizontal. El mismo Betz, cuando expone su teoría, ya apunta que el área barrida de las aspas
419 debe ser tomada en cuenta, desechando la zona que no es barrida por el viento. En [5] lo afirma varias veces explícitamente, por
420 ejemplo, en la traducción al español, en la página 19 viene a decir: “En la mayoría de las eólicas, la zona del rotor cerca del buje no
421 se aprovecha. A menudo conviene no tener en cuenta esta zona desaprovechada desde un principio, introduciendo en las fórmulas
422 la superficie barrida por las palas F en lugar del valor $\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2$. En este caso, el rendimiento η será algo mayor, ya que la pérdida
423 de energía a causa del buje no está incluida en esta definición del rendimiento”.

424 Por tanto, si se tiene en cuenta este hecho, el área A a tener en cuenta en el molino de Ayanz, sería menor que la turbina Savonius,
425 tal y como se muestra en la Figura 19.

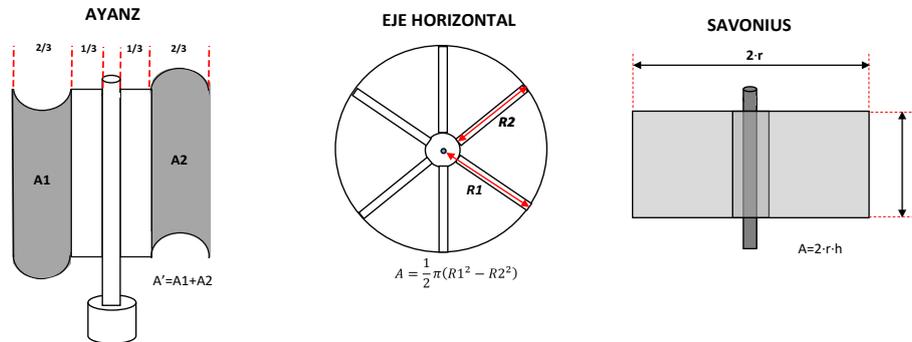


Figura 19 – Posibles áreas a considerar en diferentes molinos de viento

426
427
428
429 Por tanto, en el molino de Ayanz testeado en el presente artículo, se pasaría de un área $A = 0.45 \cdot 0.46 = 0.204 \text{ m}^2$, a un
430 área menor de $A' = 0.45 \cdot 0.3 = 0.135 \text{ m}^2$ (molino de viento sin deflector). Esto quiere decir, que los C_p obtenidos en la Figura 3
431 deberían ser multiplicados por un factor de $\approx \frac{0.207}{0.135} = 1.533$. Por tanto, si se da por válido este razonamiento, los valores de C_p
432 máximos obtenidos con el molino de Ayanz serían los más altos, en comparación al resto de turbinas estudiadas, tal y como se
433 muestra en la Tabla 3.

434 **Tabla 3 – Coeficientes C_p máximos recalculados, considerando que el área barrida por las aspas en el molino de Ayanz**
435 **es únicamente las partes cóncavas y convexas (según se deduce de la teoría de Betz [5])**

| Turbina eólica | C_p del ensayo recalculado |
|---------------------|-------------------------------|
| Ayanz sin deflector | $C_p \text{ max} \cong 0.1$ |
| Ayanz con deflector | $C_p \text{ max} \cong 0.161$ |
| Savonius | $C_p \text{ max} \cong 0.107$ |

436
437 De todos modos, los autores son conscientes de que a este cálculo de C_p se le pueden achacar bastantes pegadas y puede ser muy
438 discutible. Sin embargo, dado que podría considerarse como una interpretación plausible de la teoría enunciada por Betz, los autores
439 han preferido plasmarla por escrito en el presente artículo, por si futuros autores quisieran profundizar más al detalle sobre la misma.

440 A nuestro entender, es más adecuado a efectos comparativos entre diferentes tipologías de turbinas eólicas, el considerar en la
441 expresión (4) el área transversal del volumen cilíndrico barrido por las aspas de la turbina tal y como se ha hecho en la sección 3.
442 De esta manera, en turbinas de eje vertical, la potencia generada se normaliza con respecto a un parámetro asociado (área
443 transversal) al volumen efectivo barrido por las aspas de la turbina. De todos modos, quisiéramos dejar este debate abierto aquí, para
444 posibles futuros análisis.

445 **D.3 – SOBRE LAS DES/VENTAJAS DEL MOLINO DE AYANZ FRENTE A OTRAS TIPOLOGÍAS**

446 Tras haber analizado diferentes variantes del molino Ayanz de eje vertical, a continuación, se tratará de realizar una comparativa
447 más cualitativa que cuantitativa, de este diseño con respecto a otras turbinas eólicas representativas. Primeramente, en la Figura 20,
448 se muestra dónde se ubicaría el molino de Ayanz en su característica $C_p = f(\lambda)$ con respecto a otras turbinas eólicas representativas
449 concebidas siglos más tarde.

| | | |
|--|--|----------------------------------|
|  Ingeniería e Industria | CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA | Tecnología energética |
| ARTICULO INVESTIGACION | Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad | 3322.02 Generación de energía |

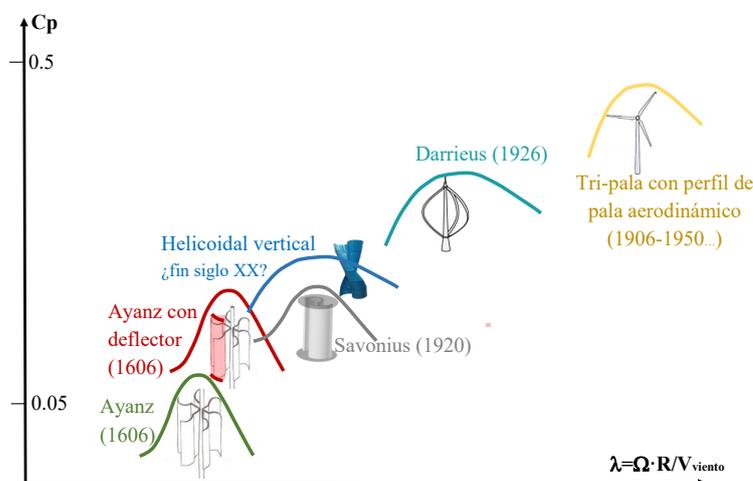


Figura 20 – Característica $C_p = f(\lambda)$ del molino Ayanz con respecto a otros molinos de viento representativos concebidos siglos más tarde

Finalmente, en la Tabla 4, se muestra un resumen de las características generales del molino Ayanz confrontándolo frente a otros molinos de viento representativos.

Tabla 4 – Características generales del molino Ayanz de eje vertical

| | |
|--|--|
| Fuerzas originarias del giro del molino | Es un molino cuyo giro se origina debido a las fuerzas de empuje producidas por el viento. No hace uso de fuerzas de sustentación, como molinos de eje horizontal u otros. Por tanto, presenta coeficientes de potencia (C_p) menores que los molinos que hacen uso de las fuerzas de sustentación (por ejemplo tri-palas y Darrieus). |
| Coefficiente C_p | Tras los ensayos experimentales realizados con el prototipo desarrollado, presenta unos valores de C_p entorno a 0.1. No es descartable que prototipos futuros más afinados puedan mejorar este valor. |
| Necesidad de orientarse a la dirección del viento | -Sin deflector, no necesita orientarse al viento, tal y como sucede en la práctica totalidad de molinos de eje vertical, pero obtiene un valor de C_p bastante bajo. -Sin embargo, con deflector, necesita orientar al viento el ingenio de la puerta corredera giratoria complicando su diseño práctico, para obtener un valor de C_p similar al Savonius. |
| Par de arranque | -Se ha observado que tiene un par de arranque muy bajo, incluso menor que el Savonius. Por tanto, tiene capacidad de generar energía a muy bajas velocidades de viento. -Esta característica es ventajosa, frente a un molino tri-pala por ejemplo, que dado que posee un par de arranque mayor, estaría parado sin generar energía a velocidades de viento en las cuales el Ayanz estaría generando un poco cantidad de energía. |
| Diseño y construcción | -En principio, su diseño y construcción es fácil y puede materializarse de forma barata. Es un molino fácilmente realizable, al igual que el Savonius, por cualquiera que tenga unas nociones básicas de mecánica y cierta pericia manual. -Frente a un molino tri-pala con aspas de diferente sección para conseguir buenos coeficientes C_p , el molino Ayanz es un molino mucho más fácilmente construible por todo el mundo en general. |
| Material utilizado para las aspas | A igualdad de volumen barrido por las aspas, el molino de Ayanz en principio requiere algo más de superficie de chapa que un molino Savonius, por lo que el molino de Ayanz saldría algo más caro. |

| | | |
|--|--|----------------------------------|
|  Ingeniería e Industria | CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL MOLINO DE VIENTO DE AYANZ DE EJE VERTICAL EN APLICACIONES DE MINI EÓLICA Y APORTACIONES EN LA SIMPLIFICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ASOCIADA | Tecnología energética |
| ARTICULO INVESTIGACION | Aitor Agirre, Juan José Costa, Mikel Ezkurdia, Haitz Gezala, Orkatz Askasibar, Xabier Agirre, David Cabezuelo, Gonzalo Abad | 3322.02 Generación de energía |

| | |
|--|---|
| Velocidad de giro de las aspas | Opera a bajas velocidades de giro de las aspas, en contraposición a las velocidades de giro mayores, propias de molinos de eje horizontal como el tri-pala. Esto hace que el ruido acústico sea menor y reduce el peligro si entra un objeto en sus aspas y choca con ellas. También las fuerzas de fatiga soportadas por el molino de Ayanz, son menores que en un molino tri-pala. |
| Meseta de las curvas de C_p – Velocidad de viento variable | El molino de Ayanz, al igual que el molino Savonius y en contraposición a los molinos tri-pala del rango de potencias de la mini-eólica, presenta una meseta de curva de C_p bastante amplia. Es decir, el rango de velocidades de giro en que se está muy cerca del máximo valor de C_p es amplio. Sin embargo, en molinos tri-pala, suele ser típico que las curvas presenten picos más puntiagudos, provocando que una ligera variación de velocidad de giro reduzca drásticamente el coeficiente C_p efectivo obtenido. Este hecho facilita mucho en el molino de Ayanz el extraer más energía en vientos racheados (poco constantes) que en un molino tri-pala, dado que, aunque el algoritmo de máxima extracción de potencia no acierte exactamente con la velocidad de giro óptima a una velocidad de viento dada, el decremento de C_p efectivo no es muy significativo. |
| Viento racheado que cambia a menudo de dirección | El molino de Ayanz sin deflector, al igual que otros molinos de eje vertical, es ventajoso en momentos en que el viento cambia de sentido (muy típico en ubicaciones donde hay muchos montes, edificios u obstáculos en general) dado que no necesita orientarse a la dirección a la cual sopla el viento. Este fenómeno, en general, resta efectividad en molino tri-pala que requieren estar orientándose continuamente a la dirección del viento. |
| Ubicación a priori idónea | El molino de viento Ayanz de eje vertical (al igual que el Savonius), puede conseguir producciones de energía eléctrica muy competitivas frente a un molino tri-pala, en ubicaciones donde a menudo a lo largo del año sucede: se tienen vientos bajos, variables (poco constantes) y que cambian de dirección continuamente. |
| Configuraciones eléctricas de extracción de energía eléctrica MPPT y “Bajo Coste” | Mediante las validaciones experimentales realizadas, se ha mostrado que ambas configuraciones eléctricas en modo MPPT y “Bajo Coste”, en términos generales son capaces de extraer muy similares cantidades de energía del viento, para los molinos de Ayanz y Savonius estudiados. Ello implica, que en los molinos de viento con dimensiones más pequeñas y por tanto con potencias de generación intrínsecamente bajas, puede salir más provechoso el utilizar una configuración eléctrica de extracción “bajo coste”, reduciendo de esta manera el coste de inversión del molino y las pérdidas propias de su electrónica asociada. Por el contrario, en molinos de dimensiones mayores y por tanto, con mayores potencias de extracción, las pérdidas asociadas a la electrónica de control, tendrían menos peso frente a la generación, por lo que podría tener más sentido el utilizar una configuración eléctrica en modo MPPT. |

457