

## Propuesta de electrónica de potencia para la protección y optimización del desempeño de una turbina eólica de baja potencia conectada a la red eléctrica de baja tensión

Marasco, Damián; Bufanio, Ruben Domingo; Monte, Gustavo; Scarone, Norberto; Agnello, Ariel; Zappa, Andrés; Amadio, Mariano; Wild Cañon, Carlos

### Damián Marasco

damian.n.marasco@gmail.com

UTN, FRN, Argentina

### Ruben Domingo Bufanio

rbufanio@frn.utn.edu.ar

UTN, FRN, Argentina

### Gustavo Monte

gusmonte25@yahoo.com.ar

UTN, FRN, Argentina

### Norberto Scarone

nscarone@frn.utn.edu.ar

UTN, FRN, Argentina

### Ariel Agnello

aagnello@frn.utn.edu.ar

UTN, FRN, Argentina

### Andrés Zappa

azappa@inti.gob.ar

Laboratorio de Energía Eólica, Instituto de Tecnología Industrial (INTI), Neuquén, Argentina

### Mariano Amadio

amadiom@inti.gob.ar

Laboratorio de Energía Eólica, Instituto de Tecnología Industrial (INTI), Neuquén, Argentina

### Carlos Wild Cañon

cwildcanon@inti.gob.ar

Laboratorio de Energía Eólica, Instituto de Tecnología Industrial (INTI), Neuquén, Argentina

### Ingenio Tecnológico

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN-e: 2618-4931

Periodicidad: Frecuencia continua  
vol. 5, e045, 2023

ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 03 Diciembre 2023

Aprobación: 04 Diciembre 2023

Publicación: 04 Diciembre 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2663842009/>

**Resumen:** Las turbinas eólicas pequeñas “SWT, de sus siglas en inglés” han sido una opción común para la electrificación rural durante décadas recientes. Pero hace algunos años se vienen desarrollando diversas opciones de electrónica de potencia para vincular de manera adecuada estos sistemas a la red eléctrica, que más allá de los desafíos técnicos, la conclusión es la poca existencia de convertidores de potencia comerciales para energía eólica en el orden o por debajo del kW de potencia, donde la mayoría de las empresas han incursionado sus desarrollos hacia la energía solar fotovoltaica, (PV). A pesar de esto, y dado la necesidad en la Argentina de poder seguir aprovechando la energía eólica en pequeña escala, pero con vinculación a la red eléctrica, y de las diferencias conceptuales con la solar PV, este trabajo, a través de lo hecho en el programa SWTOMP entre UTN FRN, INTI, CIEMAT, y otras instituciones, propone una alternativa de electrónica de potencia, del tipo chopper, (de código abierto o uso libre). Adecuando estos convertidores a la eólica de baja potencia (menor a algunos kW), y en principal para ello desarrollando un novedoso y simple control, que proteja, debido a las rápidas variaciones del recurso eólico, tanto al sistema mecánico por sobre velocidades de giro como al inversor de sobretensiones. Por otra parte, ubique al aerogenerador en un estado general cercano al óptimo según sus especificaciones. Por lo tanto, se muestra el desarrollo tecnológico y los auspiciosos primeros resultados, por medio de las medidas tomadas en el laboratorio de evaluación de aerogeneradores que posee el INTI en CutralCó-Neuquén, Patagonia Argentina, sobre un aerogenerador de 1kW de la firma EOLOCAL.

**Palabras clave:** Eólica Baja Potencia, Sobre Voltaje, Control.

**Abstract:** Small “SWT” wind turbines have been a common choice for rural electrification for recent decades. But for some years, various power electronics options have been developed to adequately link these systems to the electrical grid, which beyond the technical challenges, the conclusion is that there are few commercial power converters for wind energy in the order or below the kW of power, where most companies have ventured their developments towards photovoltaic solar energy (PV). Despite this and given the need in Argentina to be able to continue taking advantage of wind energy on a small scale, but linked to the electrical grid, and the conceptual differences



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

with solar PV, this work, through what was done in The SWTOMP program between UTN FRN, INTI, CIEMAT, and other institutions, proposes a power electronics alternative, of the chopper type, (open source or free use). Adapting these converters to low power wind power (less than a few kW), and mainly for this, developing an innovative and simple control, which protects, from the rapid variations of the wind resource, both the mechanical system due to overspeeds of rotation and the inverter from overvoltages. On the other hand, locate the wind turbine in a general state close to optimal according to its specifications. Therefore, the technological development and the auspicious first results are shown, through the measurements taken in the wind turbine evaluation laboratory owned by the INTI in CutralC6-Neuquén, Patagonia Argentina, on a 1kW wind turbine from the company EOLOCAL.

**Keywords:** Low Power Wind, Overvoltage, Control.

## INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas se plantean cambios en la manera de obtener la energía eléctrica, la cual va hacia un desarrollo sostenible en el lugar de consumo, promoviendo la descarbonización, descentralización y brindando además beneficios socioeconómicos. En función de ello, como contribución, en la Argentina se sanciona y reglamenta la ley 27.424 de generación distribuida, dando la posibilidad de una participación activa a los usuarios conectados en las redes de suministro de baja tensión. Frente a ello, por lo tanto, es probable que la eólica de baja potencia, según el recurso disponible, pueda convertirse en una interesante opción. Por lo tanto, la evolución de las turbinas eólicas de baja potencia en Argentina está migrando de los sistemas tradicionales acoplados en CC a los modernos sistemas acoplados en CA, que, incluso requieren equipos específicos para la conexión a una red de CA (Resolución 349/2021 del Ministerio de Economía de Argentina, 2021). Así mismo, un marco legal reciente (Ley 27.424, 2018), estimuló la generación distribuida a partir de fuentes renovables; por lo tanto, Eolocal estaba interesado en adaptar la versión aislada existente de la turbina eólica AG700 a una versión conectada a la red, el modelo AG1000, que se muestra en la Figura 1.

Frente a lo anterior en los sistemas eólicos de baja potencia existe una gran variedad en cuanto a configuraciones y tecnologías posibles de conversión de la energía del viento. A pesar de ello, los mercados actuales están dominados principalmente por la basada en el generador de imanes permanentes. Existen varias topologías de conversión para esta tecnología, sin embargo, la mayoría de los aerogeneradores por debajo de los 50kW conectados a la red, utilizan como lo indica la Figura 2a y 2b, dos disposiciones predominantemente (Bufanio et. al.,2022; Arifujjaman et. Al.,2009; de Freitas et. al.,2016; Arifujjaman et. al., 2011), por lo general sobre los 10kW con una electrónica de potencia y control de desarrollo propio, y en la segunda opción se adquieren o adaptan convertidores comerciales al sistema electromecánico. Es en esta última y por debajo del kW donde se ha centrado este trabajo, ya que más dificultades se encuentran en el mercado para obtener soluciones técnico-económicas viables. Integra los módulos de conversión, el rectificador, los filtros, el chopper y el inversor para formar una unidad de conversión de energía eólica, que es más flexible y se usa más comúnmente en las turbinas de pequeña capacidad.

Dentro del esquema de conversión de potencia, el “convertidor del lado del generador”, en este caso un convertidor elevador, cumple las funciones de maximizar la captura de energía eólica por parte del rotor, controlar el flujo de potencia hacia el lado de la carga y optimizar la velocidad de rotación.

La Figura 3 ilustra el concepto del esquema de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT por sus siglas en ingles), mostrando una familia de curvas de potencia aerodinámica (en función del viento

incidente) y el punto de consigna que el control sitúa sobre la curva de potencia mecánica transmitida, que es proporcional al cubo de la velocidad de rotación. El eje vertical está normalizado con respecto a la potencia nominal de la turbina y el eje horizontal en relación con la velocidad de rotación nominal.



FIGURA 1  
Turbina eólica de la empresa Eolocal, modelo AG1000 de 1kW

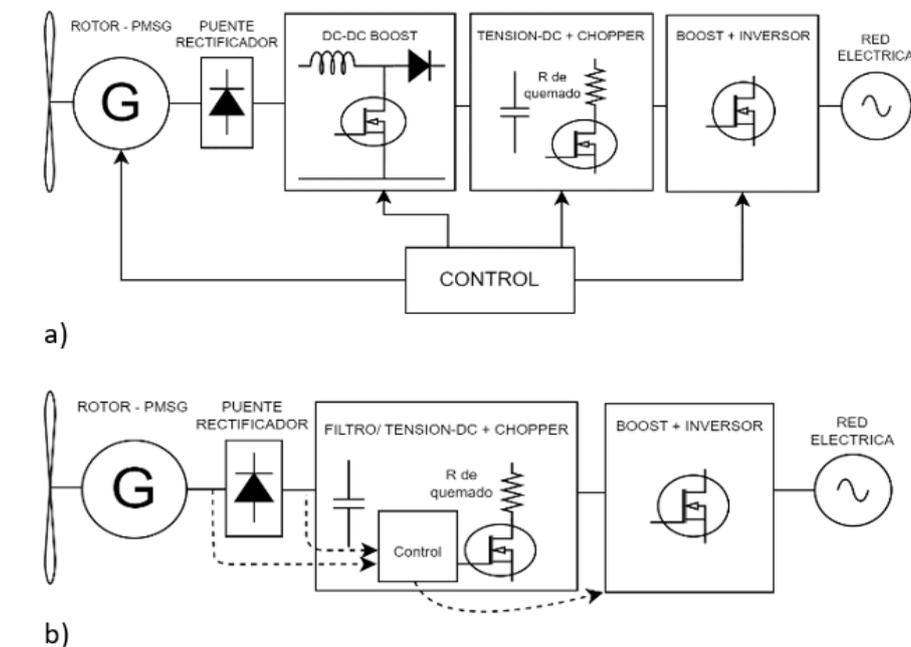


FIGURA 2  
Aerogenerador de baja potencia basado en generador sincrónico a imanes permanentes.

- a) Todas las partes principales diseñadas e implementadas como una sola unidad, b) Integración con componentes estándar del mercado.

Una vez superada la velocidad del viento a la que se obtiene la potencia nominal, el sistema de control de potencia deberá empezar a regular la velocidad de giro hasta alcanzar la de consigna. En las turbinas, esto es principalmente a través del control aerodinámico pasivo (Wood, 2011; Bialasiewicz, 2003). Junto a lo anterior, la posibilidad de conectarse a la red, normalmente sin un sistema de baterías, hace que la turbina experimente fluctuaciones transitorias por ráfagas u otras condiciones, lo que requiere que el control de potencia involucre un convertidor electrónico capaz de mitigar las elevadas tensiones que pueden causar fallas en la conversión de energía y a su vez perjudicar la parte mecánica. Por lo tanto, las condiciones dinámicas de operación de una turbina eólica requieren el uso de electrónica de potencia de respuesta rápida, lo cual se puede lograr cambiando un patrón PWM en un dispositivo chopper, capaz de aumentar el par electromagnético actuando sobre una carga y controlar por lo tanto dichas variaciones, u otras como en

(Lumbreras et. al.,2016) donde el control, midiendo solo tensión y corriente, es impulsado por los límites nominales de corriente/par de la máquina eléctrica y/o el convertidor de potencia, en lugar de actuar sobre la potencia absorbida por una carga.

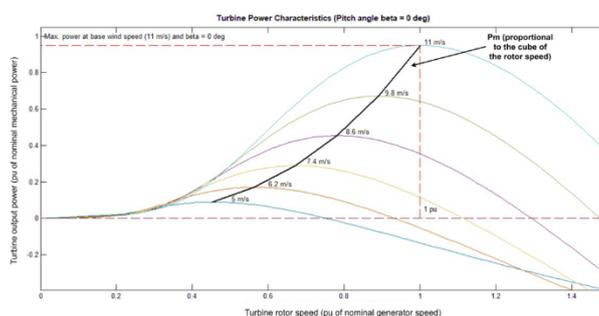


FIGURA 3

Curvas de potencia (aerodinámica) respecto a la velocidad del rotor de una turbina eólica paramétrica velocidad del viento, versus curva de trabajo óptimo.

Más allá de lo anterior, existen opciones como la de Ennera para el aerogenerador Windera, que incluye un elemento de seguridad para cortocircuitar el aerogenerador, el desarrollado por PowerOne y luego adquirido por ABB, (PowerOne. AuroraWind Box Interface.,2009), donde el sistema trabaja sobre la derivación a carga a través de un chopper y crowbar en caso de que el primero no limite por algún motivo la sobre tensión, El controlador Morningstar TriStar, (TriStar-MPPT.,2014), aunque diseñado para MPPT en solar PV, se puede adaptar por el usuario a través de una curva potencia-voltaje y usar en generación eólica, donde el TriStar Dump Resistance Controller actúa derivando potencia en caso de sobretensiones y al mismo tiempo seguir manteniendo funcionalidad cargando baterías y/o alimentando al sistema. Luego se encuentra el diseño de la compañía Voltsys, (Voltsys.com.,2021) que ha desarrollado interfaces rectificadoras inteligentes que se comunican vía Modbus con determinados inversores de red logrando un óptimo MPPT, derivando en caso necesario potencia a resistencia por PWM o en valores de este determinados en especial en caso de fallo de la red. Luego dentro de los diseños de uso libre se encuentra el conducido por los miembros de WindEmpowerment, que en especial trabajan sobre el aerogenerador Piggott, donde luego en Argentina en pos de mejorar las condiciones energéticas en los sectores rurales, utilizó la base de electrónica de potencia y control desarrollado por el laboratorio de Francia (LCA-INTEQUI), adaptándola al mencionado aerogenerador, (Catuognoet. al.,2020), programando un control por histéresis en función de especificaciones de voltaje, y derivando en caso necesario potencia a resistencias de quemado y controlando de esta manera sobretensiones.

Frente a lo dicho este trabajo en el primer apartado entrega el modelado del sistema de control propuesto, luego en el segundo detalla el desarrollo experimental, en el tercero la implementación del prototipo junto a los primeros resultados y su evaluación, por último, brinda las conclusiones.

PWM: Modulación por ancho de pulso aplicada a los convertidores de potencia.

Chopper: Interruptor controlado, situado entre una fuente de corriente continua y la carga, que se abre y cierra periódicamente.

Crowbar: Circuito eléctrico usado para evitar una condición de sobretensión, que podría dañar un sistema eléctrico.

## PROPUESTA Y MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL CHOPPER

Este trabajo, a diferencia de los anteriores, es un desarrollo local diseñado para las turbinas eólicas de baja potencia conectadas a la red que pueden utilizar inversores de tipo solar, con el propósito fundamental de

protección contra sobretensiones y flexibilidad para el usuario final en su programación. Aunque también sea posible utilizando el hardware abierto de LCA-INTEQUI, es probable que se requerirá de alguna programación o adaptación que el usuario final pueda no estar capacitado para realizar incurriendo en la necesidad de un especialista.

Como se indicó en párrafos anteriores, el problema que se aborda con esta solución proviene de las sobretensiones de CC después de la rectificación de la salida eléctrica de CA del aerogenerador, junto con la dificultad de encontrar un producto que se adapte correctamente entre el rectificador y un inversor solar fotovoltaico estándar tanto por razones técnicas como de mercado. Por lo tanto, a través del Laboratorio de Electrónica y GESE (Grupo de Estudios de Energía) de la UTN-FRN, se propuso y realizó el diseño de un dispositivo de protección contra sobretensiones para un aerogenerador de baja potencia, en este caso un aerogenerador PMSG de 1 kW con acoplamiento directo y velocidad variable controlada. Se adopta una interfaz tipo chopper, con la flexibilidad necesaria para programarse fácilmente desde un teléfono inteligente, alcanzando umbrales de tensión hasta 800 V (histéresis, es decir, mínimo y máximo), y a su vez tiempos o velocidades para configuración del PWM.

Una vez iniciada una determinada acción, se limita suavemente la velocidad del aerogenerador, lo cual es de suma importancia ya que permite una adecuada adaptación al momento de inercia, entre otras cuestiones de respuesta electromecánica, y así poder adaptarse dentro de las condiciones de trabajo y límites de potencia a diferentes turbinas del mercado. Por otro lado, tal y como muestran las pruebas de campo realizadas en el laboratorio del INTI (CutralCó-Neuquén), suaviza la variación de la tensión de entrada de DC antes de que esta llegue al inversor, facilitando su respuesta e inyección controlada de energía a la red y evitando corrientes repentinas cuyas variaciones puedan alterar el perfil de la tensión de conexión. La figura 4, muestra el diseño propuesto del sistema de protección contra sobretensiones.

De acuerdo con el algoritmo del diagrama de flujo de figura 5, se debe establecer una tensión mínima que debe estar cerca de la tensión nominal del aerogenerador, si es posible, no más del 5% por encima de su valor de potencia nominal, y con un máximo de 10% a 15% por encima de ese punto de ajuste.

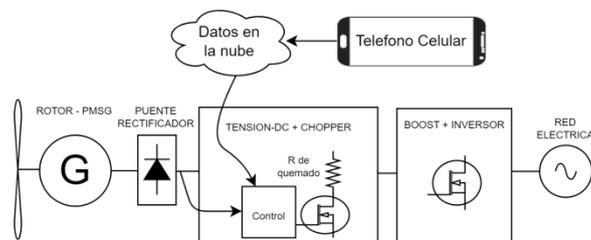


FIGURA 4

Diagrama general del sistema de protección contra sobre tensiones propuesto

El *chopper* entra en funcionamiento cuando se supera el valor de tensión DC (indicado en la Figura 5 como  $V_{DCmin}$ ), y funciona dentro de una ventana de tiempo programada en la que el ciclo de actividad debe crecer hasta un máximo cercano al 100% (interruptor de potencia siempre en ON). En tiempo real, el ciclo de trabajo PWM aplica un valor máximo, a través de un microcontrolador, al interruptor de potencia (IGBT), que surge de comparar el ciclo de actividad actual  $\delta$  con el  $\delta_v$  de la tensión de salida  $V_{dc}$  medida del rectificador, la tensión de arranque, y el rango de trabajo ( $V_{dcmin}$  y  $V_{dcmax}$ ), y con el ciclo de trabajo  $\delta t$  obtenido del tiempo ajustable. Esto hace que el ciclo de trabajo aumente hasta su máximo, cercano al 100%. De esta forma se garantiza una actuación controlada y fiable de la tensión continua y por tanto de la velocidad de giro del aerogenerador. Una vez que el voltaje desciende por debajo del umbral mínimo indicado, el sistema disminuye gradualmente la acción PWM del *chopper*, en función de otra ventana de tiempo programada, hasta que se detiene.

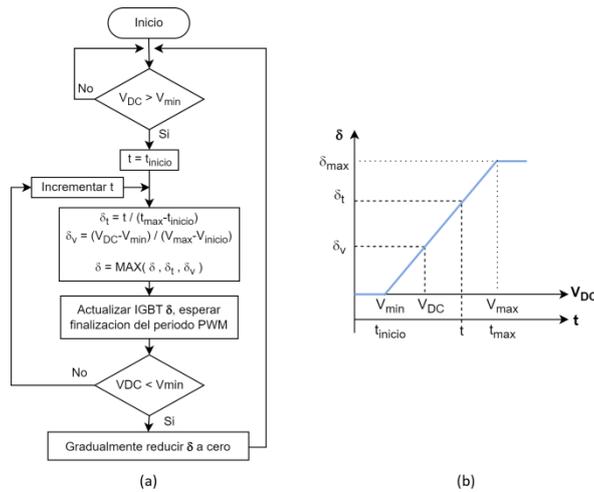


FIGURA 5

(a) Diagrama de flujo de la interfaz del Chopper PWM, (b) curva de respuesta según la configuración de voltaje y tiempo.

En las Figuras 6 a, y b se muestra el esquema del circuito del driver y del interruptor de potencia en dos canales (1200 W por canal), con posibilidad de doble salida para volcado de carga, y el esquema de medida de tensión e interfaz de programación (donde se utiliza una placa tipo WiFi o USB), respectivamente.

Se recomienda que la potencia de las resistencias de derivación por exceso de energía esté entre 1,3 y 1,7 veces la potencia nominal del aerogenerador; esto contribuye a un ajuste fiable y suave del sistema. Dada la flexibilidad en la programación de la interfaz, es necesario definir de antemano las instrucciones de trabajo en función del aerogenerador en particular y luego calibrarlas en el campo.

En la figura 7 se muestra el esquema circuital con las distintas entradas para la configuración, incluida la placa WiFi, la conexión DC del rectificador y las resistencias de desvío.

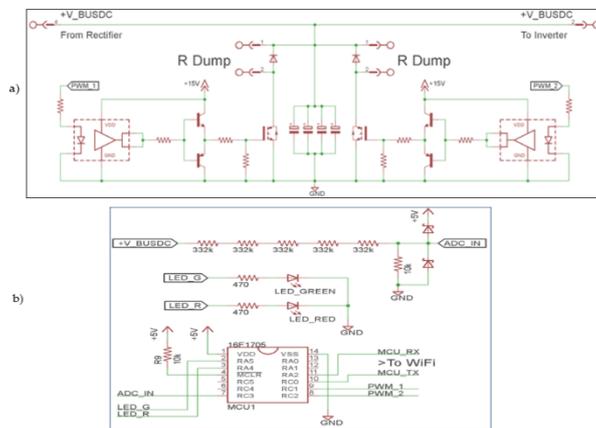


FIGURA 6

(a) diagrama de circuito del controlador y el interruptor de potencia, (b) diagrama de circuito del microcontrolador con placa WiFi y medición.

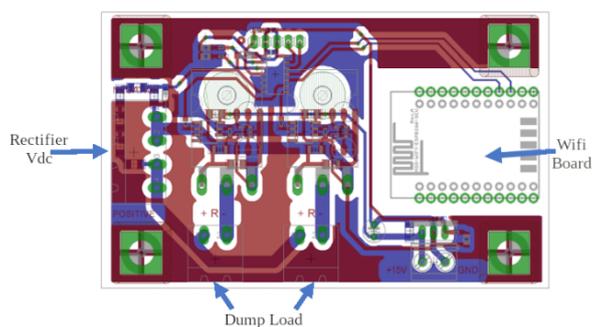


FIGURA 7  
Esquema de la placa electrónica del prototipo experimental.

## IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En la figura 8 se muestra una imagen del prototipo electrónico experimental desarrollado, y en figura 9 la carga de derivación compuesto por un banco de 32 resistencias de 25 ohmios/100 W cada una, configuradas para obtener 50 ohmios con posibilidad de disipar hasta 3200 W. El aerogenerador utilizado fue un aerogenerador de eje horizontal con generador PMSG de seis polos, 1000 W de potencia nominal, con Vdc nominal de 300 V a 350 rpm, para viento de 12 m/s. Como se muestra en la figura 8 anterior, la salida del generador se rectificó y conectó a un inversor solar fotovoltaico comercial estándar, como acople de red, Omnik New Energy, modelo Omniksol 1K-TL2-M, con una potencia nominal de 1000 W, voltaje nominal de CC 360 V y máximo de 500 V, y salida monofásica de 220 V, 50 Hz.

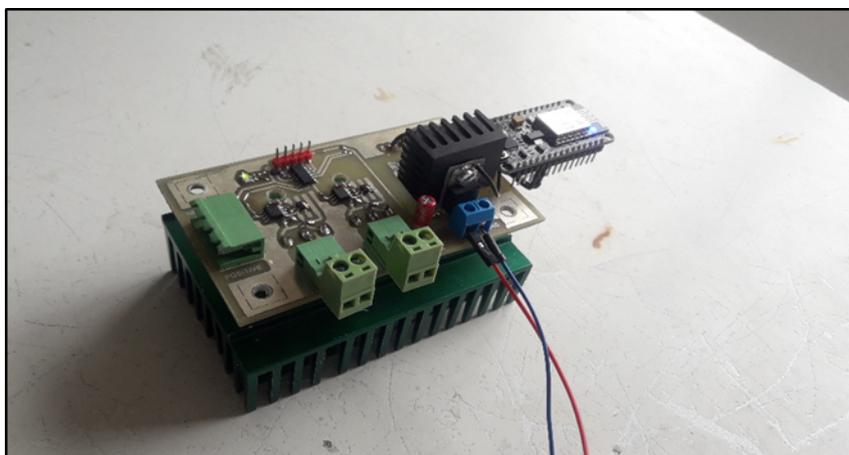


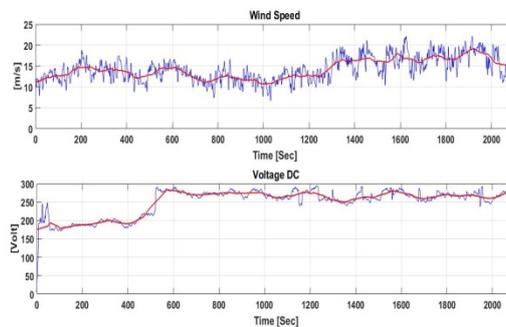
FIGURA 8  
Prototipo experimental de chopper con comunicación WiFi.



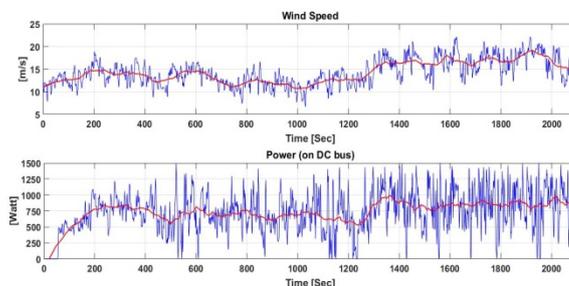
**FIGURA 9**  
Banco de resistencias (dump load).

Las figuras 10 y 11 muestran las medidas temporales de velocidad del viento, potencia y tensión continua, en una ventana de tiempo superior a 30 min, donde para el ensayo se aplicaron dos umbrales de tensión: el primero entre 200 V y 250 V durante aproximadamente 500 s, y el segundo entre 250 V y 300 V para el resto de la ventana de tiempo. Se puede observar la acción de control del chopper, manejando en todo momento la tensión DC entre los valores configurados, lo que se evidencia a través de los breves momentos en que la corriente decrece a pequeños valores cercanos a cero amperios con viento superior a 15 m/s.

Aunque no se configuró un MPPT, asociada para el inversor a la curva I-V de los paneles solares, que poco tiene que ver con la de los aerogeneradores, la potencia instantánea obtenida se acercó a los valores esperados con estas velocidades de viento, lo cual es alentador y sugiere una buena adaptación del prototipo a un inversor estándar de tipo solar.



**FIGURA 10**  
Velocidad del viento (superior) y voltaje de CC (inferior), valores instantáneos (azul) y promediados (rojo), en función del tiempo.



**FIGURA 11**  
Velocidad del viento (azul) y la potencia de CC (rojo) en función del tiempo.

Luego la siguiente figura 12, muestra el resultado de mediciones de campo del sistema eólico compuesto por el aerogenerador de 1 kW de Eolocal, la protección propuesta contra sobretensiones chopper y un

inversor para sistemas solares Omnik (On-grid) con una potencia nominal ligeramente superior a la del aerogenerador. De los resultados se observa, que, al cabo de unos minutos, aunque la velocidad media del viento estaba por encima de los 6 m/s, las potencias obtenidas se reducen a valores de unos pocos vatios, muy inferiores a los que tendría que entregar para tales velocidades de viento.

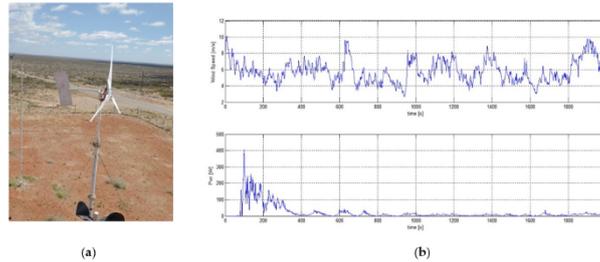


FIGURA 12

(a) Diseño de prueba de campo; (b) la velocidad del viento (superior) y la potencia de salida de CC (inferior) para la evaluación del rendimiento.

Se deduce que esto se debió principalmente al algoritmo MPPT utilizado por el inversor solar, el cual está programado para actuar de acuerdo con la curva I-V de un generador solar fotovoltaico, y por lo tanto no bien adaptado a las condiciones de operación y curvas de rendimiento de una turbina de viento, figura 13.

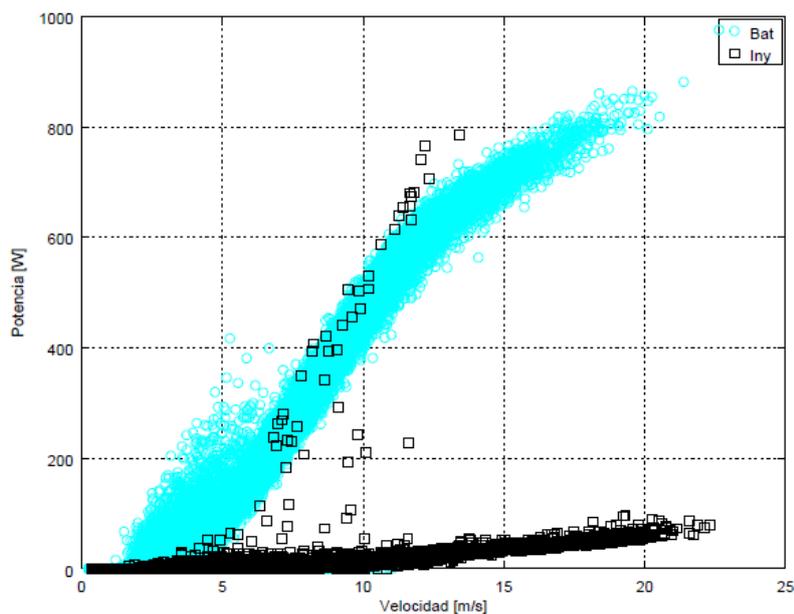


FIGURA 13

Curva de potencia del aerogenerador conectado al inversor (negro) respecto al mismo aerogenerador en modo carga de baterías (cyan).

Dado lo anterior, y a pesar de las diferencias en los principios físico-tecnológicos entre los inversores para energía eólica en relación con la solar fotovoltaica, la ventaja de costo y disponibilidad de estos últimos creó la necesidad de tratar de superar los problemas mostrados. Para ello, tras estudiar en campo el funcionamiento de un inversor solar con un aerogenerador, se concluyó que el inconveniente radicaba, como se muestra en la figura 14, en que el algoritmo MPPT del inversor solar posiciona progresivamente el aerogenerador, en base a su curva de par aerodinámico, en un punto de equilibrio que resulta en un rendimiento de baja potencia, marcado como “1”. La idea es intentar llevar el sistema, en la medida de lo posible, a una posición de trabajo,

marcada en la figura como “2”, donde su rendimiento fuera cercano al MPP del aerogenerador (Bianchi, 2007).

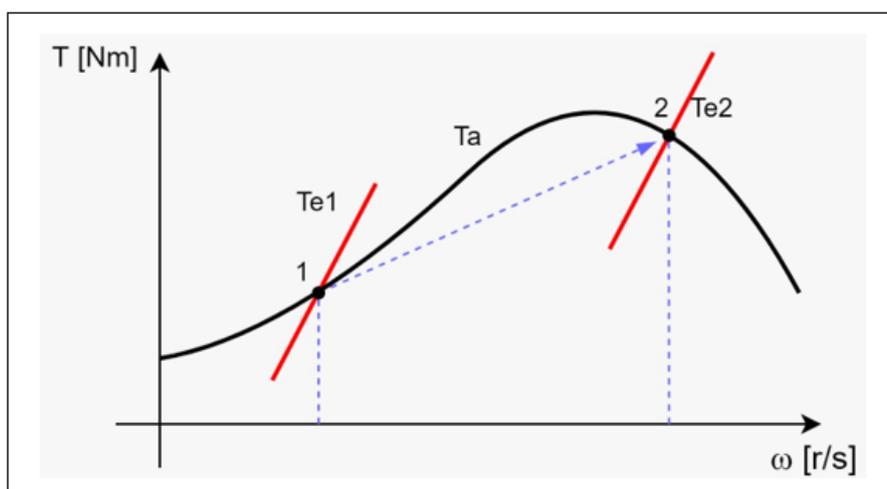


FIGURA 14

Posibles puntos de trabajo del sistema, en base al par aerodinámico del aerogenerador relativo al par electromagnético impuesto por el inversor solar.

Como se ha indicado en apartados anteriores, dado que tanto el desarrollo de inversores solares fotovoltaicos a potencias inferiores a unos pocos kW, como el hecho de que los inversores eólicos conectados a la red estándar están en su mayor parte descatálogos, y salvo en los casos de tecnologías propias desarrollados por los fabricantes, los inversores adecuados no se encuentran fácilmente en el mercado para un proyecto eólico de baja potencia.

Por lo tanto, se dedujo que el algoritmo MPPT inherente al inversor fotovoltaico, aumentaba progresivamente el par eléctrico para intentar maximizar la potencia inyectada a la red, pero esta acción provocaba en el aerogenerador su desaceleración. Esta ralentización del rotor tuvo un efecto negativo sobre el rendimiento aerodinámico, reduciendo el par mecánico disponible, y como resultado la turbina funcionando en el punto marcado con “1”, como establece entre el inversor y la potencia producida por el rotor.

Para lograr el objetivo de mejor desempeño (punto “2”, de figura 14), y aprovechando la flexibilidad de programación del *chopper*, se programó una secuencia de trabajo, mostrada en la figura 15, que permitió operar el sistema de manera similar al comportamiento energético de un sistema ideal que no requiere de tal secuencia para mover su punto de operación de “1” a “2”, brindando así una solución viable al problema planteado, tal como lo indican los resultados en las figuras posteriores. Este algoritmo se basa en reiniciar el inversor una vez que el voltaje de CC en su entrada cae por debajo de cierto umbral detectado por el sistema de medición del *chopper*. Dependiendo de los recursos tecnológicos disponibles en el emplazamiento del aerogenerador, este punto de reinicio puede programarse de forma muy sencilla a través de la interfaz del *chopper*, proporcionando una función independiente pero simultánea a la de protección principal. Esta consiste en activar el *chopper* cuando la tensión, tras un sobreimpulso inicial, cae por debajo de un valor dado, aumentando progresivamente su ciclo de actividad de cierre hasta que la tensión descienda por debajo de un mínimo, normalmente de unos 50 V. Tras lo cual el inversor renueva continuamente su acción durante varios minutos (>10 min), lo que permite que el sistema eólico funcione cercano al de su punto óptimo.

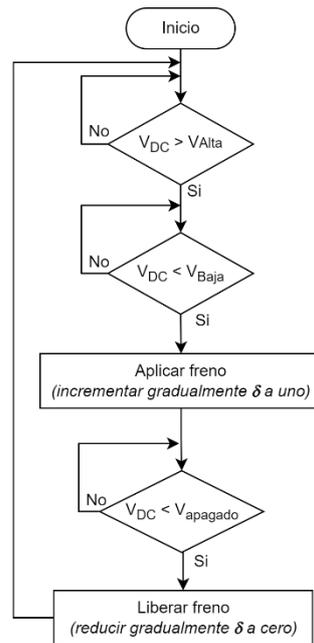


FIGURA 15

Secuencia de programación de chopper para mejorar el rendimiento energético.

La acción de desactivar el inversor fotovoltaico hace que el aerogenerador se acelere, ya que no se aplica par eléctrico al rotor, lo que tarda entre 4 y 8 s dependiendo de las condiciones del viento y las características del aerogenerador. Cuando se alcanza la tensión máxima de CC, el chopper protege el aerogenerador, desviando la energía hasta que el inversor vuelva a estar disponible.

Dado que el reinicio del inversor solar no lleva más de 40 s aproximadamente, se observa que la energía perdida al sumar estos periodos en el tiempo, no superaría el 5% del total que se podría obtener. La Figura 16, a continuación, muestra el rendimiento energético del sistema cuando se utiliza la estrategia propuesta en relación con una ideal, considerando un  $C_p$  (coeficiente de potencia) constante en todas las regiones de trabajo del aerogenerador. La propuesta es muy conservadora y favorable en este sentido, ya que muestra una potencia medida obtenida superior al 80% del óptimo.

Por otro lado, para verificar el funcionamiento de un inversor solar utilizando un “MPPT eólico”, la figura 17 muestra la comparativa entre la curva que surge de una relación de velocidad de punta de pala óptima y constante en la región de carga parcial de la turbina, en la que la corriente es función de la velocidad del viento o la velocidad de rotación al cuadrado, (Bianchi, 2007), como se observa hay una similitud con la curva de las mediciones obtenidas en campo, con una correlación mayor al 80%, mostrando en principio la bondad del método propuesto.

Igual, para una mejor evaluación de los resultados, la duración de las mediciones de campo debería extenderse y las curvas de potencia integrarse con la distribución de ocurrencia de viento; bajo estas condiciones, el beneficio a obtener a través de la funcionalidad adicional en el controlador del chopper debería ser notorio.

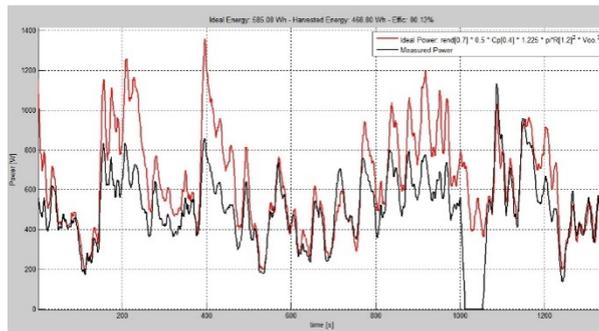


FIGURA 16

Comparación de energía entre un sistema "ideal" y el sistema chopper utilizando la funcionalidad de reinicio adicional.

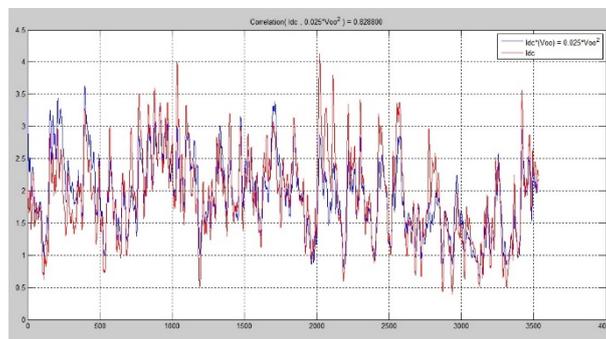


FIGURA 17

Comparación de la variación de la corriente DC relativa a la función cuadrática de la velocidad del viento. Nota: eje de ordenadas [A], eje de abscisas [s].

Por último, y no menos importante, el usuario puede programar la mejor opción de forma sencilla a través de su interfaz, en función de las condiciones del viento y del aerogenerador, sin coste adicional del sistema.

En conclusión, se corroboró el buen desempeño del prototipo experimental tanto en laboratorio como en campo, quedando como trabajo futuro integrar una fuente de alimentación para el driver y el controlador desde la misma alimentación de DC, y luego agregar para mayor seguridad un controlador del tipo *crowbar*, y continuar ajustando el algoritmo de control a través de más pruebas y ensayos.

## CONCLUSIONES

La energía eólica de baja potencia puede satisfacer la demanda eléctrica de los sistemas aislados acoplados a CC, y también puede proporcionarla en sistemas acoplados a CA en lugares donde los recursos renovables lo permitan. A pesar de esto, es difícil obtener en el mercado convertidores de potencia disponibles comercialmente, especialmente controladores e inversores para eólica por debajo de unos pocos kW y aún más < 1 kW. Una razón particular de esto es el aumento en los costos relativos de la electrónica de potencia a medida que disminuye el rango de potencia, lo que desalienta a los fabricantes tradicionales de continuar brindando tecnologías que apoyen la generación eólica de baja potencia.

Una posible solución a lo anterior surge en la adopción de inversores solares fotovoltaicos. En principio, esto no permite la sustitución directa, ya que, como se muestra en este trabajo, existen diferencias conceptuales de funcionamiento entre los sistemas de generación fotovoltaica y eólica, como la necesidad en esta última de incluir electrónica de potencia capaz de proteger el sistema de generación en su conjunto, tanto mecánicamente (aerogenerador) como eléctricamente (inversor).

Para validar los resultados de esta revisión, se propuso, desarrolló y probó un controlador chopper. Los primeros resultados de las pruebas mostraron que, además de cumplir con los objetivos de seguridad, contribuyó en gran medida a garantizar que un aerogenerador con un inversor solar PV ofreciera un rendimiento energético similar o incluso mejor que otras alternativas, como con almacenamiento en versión aislada.

Por otro lado, se obtuvo una flexibilidad en la programación a través de una interfaz de usuario que permite una adaptación simple entre las condiciones del viento en el sitio y el aerogenerador, en un amplio rango de potencia y voltaje. Además, añade una interesante característica tecnológica que permite variar la velocidad de actuación en el ciclo de actividad PWM, lo que contribuiría, dado la adecuación a los momentos de inercia presentes, a reducir el mantenimiento y por tanto aumentar la vida útil del aerogenerador.

Queda como trabajo futuro, continuar evaluando esta propuesta y comparar su desempeño con otras tecnologías de aerogeneradores e inversores solares, a fin de ratificar el desarrollo como válido de acuerdo con las necesidades tecnológicas y costos que existen en la actualidad, y en relación con otras opciones de generación.

## AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Ing. Luis Arribas del CEDER-CIEMAT de España, líder del proyecto SWTOMP, que motivó mucho de este trabajo. Asimismo, por el apoyo de sus otros integrantes, Javier de la Cruz del INNEL de México, y Timo Karlsson de la VTT de Finlandia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Resolución 349/2021 del Ministerio de Economía de Argentina: Contratación del Diseño, Construcción y Puesta en Operación de Cinco Plantas de Generación Fotovoltaica y Eólica con Almacenamiento, Integradas a una Mini Red dentro del Programa PERMER: <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/243511/20210426>.
- Ley 27424. (2018). Fomentar la Generación de Energía a partir de Fuentes Renovables para Autoconsumo y la Inyección de Excedentes al Sistema Interconectado en Argentina. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/generacion-distribuida>.
- Bufanio R., Arribas L., de la Cruz J., Karlsson T., Amadio M., Zappa A., Marasco D. (2022). An update on the electronic connection issues of low power SWTs in AC-coupled systems: a review and case study. *Energies*, MDPI.
- Arifujjaman, Md.; Iqbal, M.T.; Quaioco, J.E. (2009) Performance Comparison of Grid Connected Small Wind Energy Conversion Systems. *Wind. Eng.*, 33, 1–18.
- de Freitas, T.R.; Menegáz, P.J.; Simonetti, D.S. (2016). Rectifier topologies for permanent magnet synchronous generator on wind energy conversion systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 1334–1344.
- Arifujjaman, Md.; Iqbal, M.T.; Quaioco, J.E. (2011). Power Electronics Reliability Comparison of Grid Connected Small Wind Energy Conversion Systems. *Wind. Eng.* 35, 93–110.
- Wood, D. (2011). *Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- C. Lumbreras; J. M. Guerrero; P. Garcia, F. Briz; and D. Daz Reigosa. (2016). Control of a Small Wind Turbine in the High Wind Speed Region. *IEEE Transactions on Power Electronics*, VOL. 31, NO. 10, October 2016.
- Power One. AuroraWind Box Interface. Installation and Operator's Manual. (2009). Disponible en línea: [https://alternateenergycompany.com/pdf/powerone/PowerOne\\_pvi-7200-wind\\_interface.pdf](https://alternateenergycompany.com/pdf/powerone/PowerOne_pvi-7200-wind_interface.pdf) (acceso diciembre 2021).
- Tristar-MPPT. (2014): <https://www.solar-electric.com/lib/wind-sun/TriStar%20MPPT%20150V%20and%20600V%20Wind%20Charging%20Control%20Info.pdf> (acceso diciembre 2021).

G. Catuogno; L. Villa; J. Alinei; C. Catuogno. (2020). Open source Hardware Technology, a sustainable solution to achieve energy for all the global south. In Proceedings of the VIII International Conference on Sustainable Development (ICSD2020), New York, NY, USA, 21–22 September 2020.

Bianchi, F. (2007). Wind Turbine Control Systems; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.