

EVOLUCIÓN Y ENSAYO DE CONVERTIDORES MODULARES DE ELECTRONICA DE POTENCIA PARA ENERGIAS RENOVABLES

L. Lavado Villa¹, J.Alinei², R.Oliva³ y R. Blanchard⁴

1. Universidad de Toulouse, Francia

2. Instituto de Tecnología de Grenoble, Francia

3. Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA) Instituto de Tecnología Aplicada, Area Energías Alternativas

4. Industrial Engineering School of Grenoble Institute of Technology - Francia

UARG - L.Rivera y Gregores, 9400 Río Gallegos - Santa Cruz, Argentina TE 02966 442317/19 int 21, email:

rafael.beltran.oliva@gmail.com

Recibido: 11-03-19; Aceptado: 03-06-19.

RESUMEN.- La Red WindEmpowerment (WE) lanzó a través de su *Grupo de Trabajo en Tecnología* en 2016 un Proyecto conjunto de investigación y aplicación de electrónica de potencia denominado Modular Power for the People (MPP), que obtuvo financiamiento del Instituto Wuppertal /WISIONS, para crear un producto de hardware y software abierto que cubriera las necesidades de sus organizaciones miembros. Dicha red (WE) es una organización civil internacional que fomenta el conocimiento compartido y la utilización de fuentes renovables (sobre todo eólica de baja escala) para resolver problemas de electrificación rural. Los fundamentos del proyecto plantean que si bien la red y muchos usuarios utilizan diseños electromecánicos abiertos (turbina Piggot y otros), los convertidores de electrónica de potencia en general no lo son. El Proyecto MPP buscó desarrollar, a través de la implementación colaborativa, una alternativa de diseño electrónico abierta y pública tanto para ONGs que buscan hacer llegar una solución energética en sitios aislados, como también para fabricantes que al adherir al concepto modular y estándar, provean alternativas compatibles. A inicios de 2018 se obtuvo a través de un proyecto de la Comunidad Europea (ERIGRID) financiamiento para realizar un ensayo de dos semanas en un laboratorio especializado (NTUA / Atenas) de los prototipos convertidores. En el presente trabajo se describen los avances en el desarrollo iniciado en 2016 de los módulos y los ensayos realizados sobre los prototipos de convertidores CC/CC, rectificador activo trifásico y placa madre de los módulos de electrónica de potencia para energías renovables.

Palabras claves: energías renovables, convertidores electrónicos modulares, estándares, energía eólica y fotovoltaica.

EVOLUTION AND TESTING OF MODULAR POWER ELECTRONICS CONVERTERS FOR RENEWABLE ENERGIES

ABSTRACT.- This paper presents further work on a project started in 2016, aimed to develop open-source and open-hardware power modules for small-scale wind and photovoltaic rural electrification systems. Funding was obtained through an EU Project to perform a Transnational Laboratory Access at NTUA (Athens, Greece) at the ICSS/SmartRue facilities, to test the modules in complex configurations emulating real-world conditions, such as output from solar panels for different levels of radiation. A brief part of the testing and results are explained in this work. Troubleshooting the designs and performing exchanges with local experts will help in the future versions to refine the design criteria and expected solutions, as well as many of the implementation issues. It is expected that the outcome of the test sequences will help promote the widespread use of renewable energy.

Keywords: power electronics, testing, modular systems, wind energy, photovoltaic systems, measurement

1. INTRODUCCIÓN

Entre 2010 y 2016 el número de personas en el mundo que carecen de suministro eléctrico regular, se redujo cerca de 20%, de 1400 a 1100 millones de personas (Ren21, 2017). Sin embargo, dicha reducción no ha sido pareja y en algunos casos (África Sub-Sahariana), la reducción ha sido cercana al 1%, y de todas maneras el número de las carencias es enorme. Muchas de las soluciones energéticas recientes para estos casos incorporan energía fotovoltaica o eólica de baja potencia. Estas fuentes, y otras renovables pueden proporcionar una solución viable a este problema,

permitiendo a comunidades remotas utilizar sus propios recursos naturales y librarse de la trampa de la pobreza.

La red Wind Empowerment (WE, 2016) agrupa a múltiples organizaciones, entre las que se cuentan ONGs, universidades, cooperativas, fabricantes de turbinas, organizaciones sociales, centros de entrenamiento y mas de 1000 participantes individuales de todo el mundo, cuyos miembros están activamente involucrados en instalaciones de eólica, fotovoltaica, microhidráulica u otro tipo de energías renovables. Para la parte mecánica y eléctrica de los aerogeneradores, la red promueve el diseño abierto Piggot (Scoraig, 2016) que es ampliamente conocido por su

confiabilidad y replicabilidad. Sin embargo, en general se depende de diseños propietarios y muchas veces costosos en lo que se refiere a convertidores electrónicos de potencia. Estos equipos requeridos necesitan un largo proceso de diseño y ensayos complejos, por lo cual las empresas del rubro buscan cubrir sus costos y obtener lógicamente una ganancia. En muchos casos no existe capacidad productiva de este tipo de equipos en los países donde se realiza la instalación, por lo cual los costos de importación se agregan a las cargas del proyecto.

El proyecto MPP/SEPS (SEPS, 2016) iniciado en 2016 (J.Alinei y otros, 2016) buscó cubrir la falta de una alternativa de diseño abierta y pública que permita a grupos o individuos implementar sus propias soluciones electrónicas orientadas a energía renovable. A través de una tecnología *open-source* se permite a actores locales construir su propia cadena de

conversión eléctrica, y también a fabricantes que, al adherir al concepto modular y estándar, para proveer alternativas compatibles con esta iniciativa. Por tratarse de un sistema aislado con almacenamiento, el núcleo del mismo se orientó hacia el banco de baterías, dando la opción en algún caso de combinar bancos de baterías de distintos niveles de tensión a través de un convertidor CC/CC. En este y otros casos, los módulos requeridos son en su mayoría convertidores electrónicos conmutados de alta eficiencia entre dos niveles de corriente continua (marcados *DC/DC*) o de alterna (*DC/AC* o *AC/AC*), según sus siglas en inglés. En posteriores avances del proyecto, se presentó con mayor claridad la importancia del diseño enfocado a *Micro-Grid* (microrredes), o sea una red convencional de baja potencia (monofásica o trifásica) para la vinculación de los componentes de ER (figura 1 – vinculación en CC).

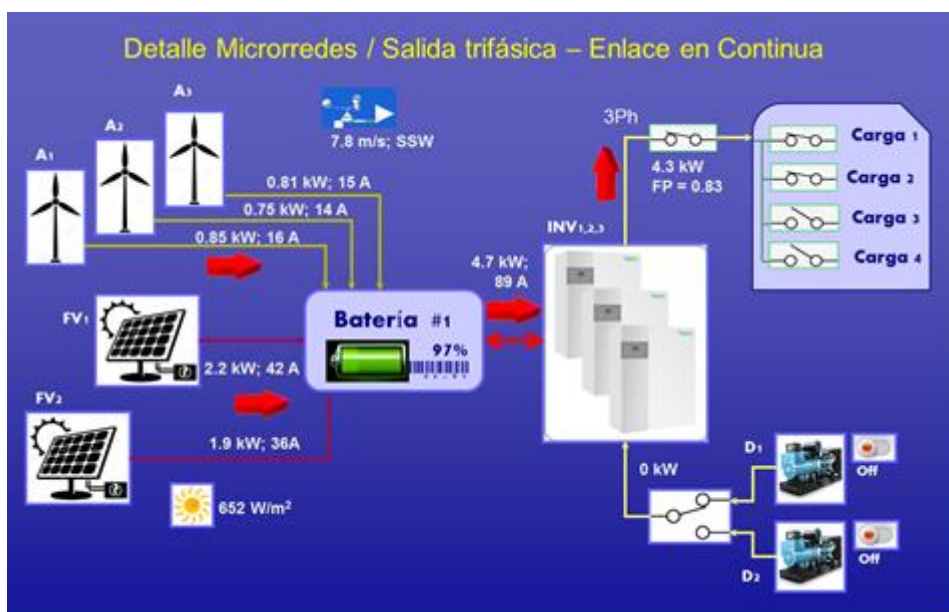


Fig. 1: Proyecto MPP y evolución hacia el concepto de Micro-Grid

Los niveles de tensión y corriente (y por tanto de potencia) varían significativamente con la aplicación, como así también el tipo de vinculación. A lo largo del período 2016 a 2018 se trabajó sobre diseño de prototipos que se insertaran en una plataforma estandarizada y cuentan con un módulo central común configurable (Motherboard que implementa una HMI o interfaz con el usuario). El módulo central será la inteligencia que comunique los módulos estándar (cada uno con su propio controlador de bajo costo) y permita configurar su operación. El objetivo del presente trabajo es mostrar los avances logrados en este concepto, y realizar una descripción de las pruebas realizadas por los autores a través del acceso a laboratorio (programa ERIGRID – (ERIGRID,2018) en la NTUA / Atenas en mayo de 2018 (Erigrid_NTUA, 2018).

2. COMPONENTES DE UNA MICRO RED

El primer diseño original fue realizado en 2016 con la interacción de las instituciones participantes en el proyecto (Alinei et al, 2016) y se muestra en la figura 2. Algunos de los miembros continuaron su participación activa en el proyecto

El sistema se centraba en la interconexión de módulos de energía eólica, solar y micro-hidráulica para realizar la carga de un banco de baterías común. Los datos de los módulos individuales (esclavos) se comunicaban al controlador central utilizando el protocolo abierto Modbus (Modbus, 2014) entre módulos. El alimentador global provee de tensiones de alimentación estables a partir de la batería a los módulos y al control central. Se buscó además que el controlador central tenga una interfase de usuario amigable, con ciertos elementos comunes y dejando abierta la posibilidad de que los usuarios realicen distintas modificaciones.

El Proyecto evolucionó desde 2016 y se ha enfocado en lo siguiente:

- Desarrollo general y consensado del sistema de acuerdo a las necesidades de los participantes, coordinación general del Proyecto (en Universidad de Toulouse)
- El diseño, armado y ensayo del prototipo de módulo de potencia Ownwall (múltiples conversiones buck/boost, permite algoritmo MPPT ó *Maximum Power Point Tracking* para hasta 100 V de entrada, y 15 A de corriente (en Universidad de Toulouse)

- Desarrollo de rectificador trifásico activo WindConverter con capacidad de algoritmo MPPT utilizando controlador dsPIC (en Universidad de Grenoble).
- Diseño, armado y ensayo de la placa madre, incluyendo el feeder o alimentador global a partir de tensión de baterías y controlador Arduino-Mega (en L&R Ingeniería y UNPA - Río Gallegos) (AEA-UNPA, 2018).

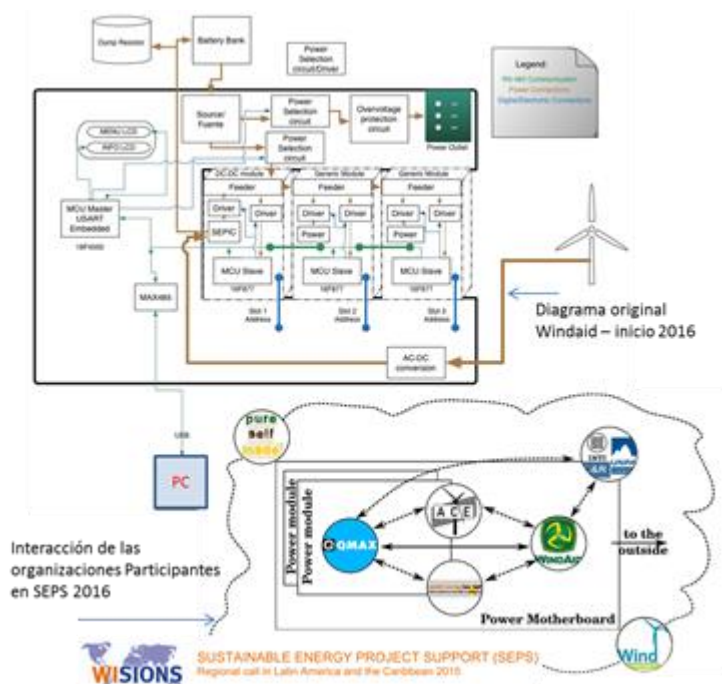


Fig. 2: Diagrama en bloques de la primera iteración de diseño Proyecto Modular Power / SEPS

La característica principal de este proyecto es que se lleva adelante a través de trabajo de integrantes de la red en empresas, universidades y otras instituciones técnicas, en algunos casos con tutorías de estudiantes avanzados de

ingeniería, coordinadas desde la Universidad de Toulouse y la red Wind Empowerment.

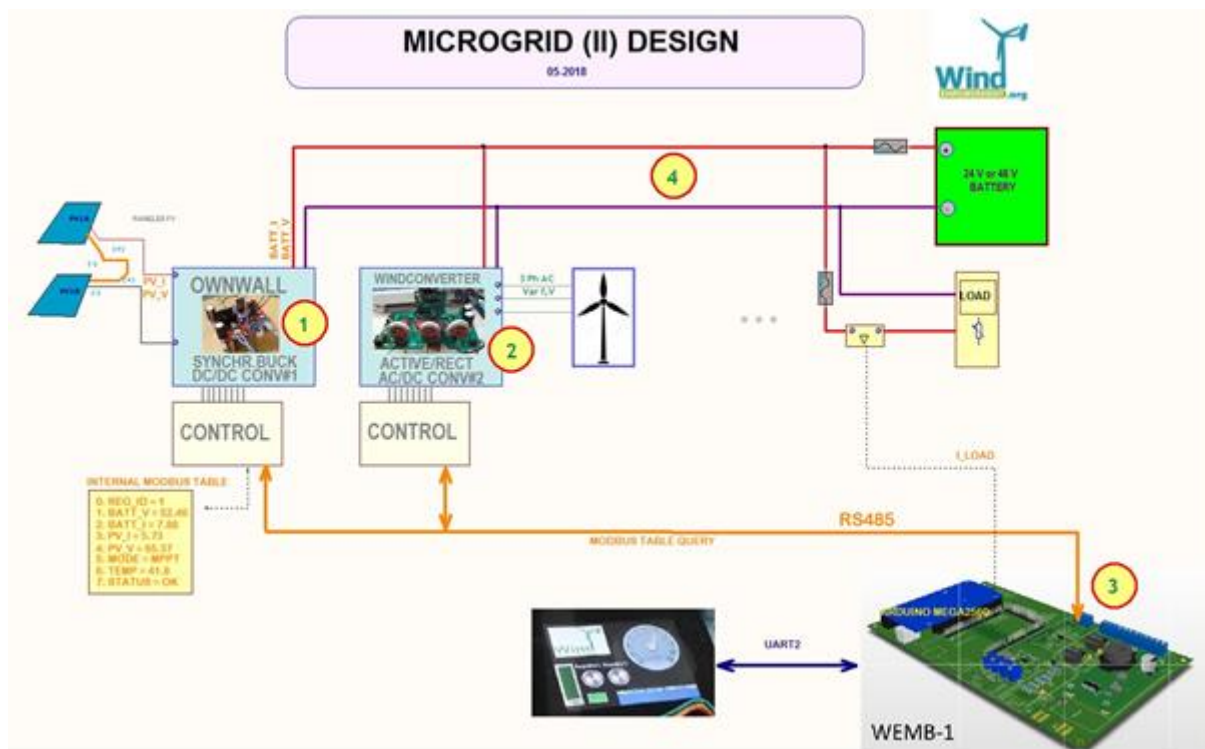


Fig. 3: Diagrama actualizado del sistema

Los componentes de la micro-red de energías renovables se muestran en el gráfico de la figura 3. Dentro de dicha Figura se aprecian los siguientes componentes numerados:

1. Conversor de una rama de CC (1) denominado Ownwall Converter;
2. Conversor de tres ramas CA/CC o rectificador activo (2)
3. Una placa madre o Motherboard WEMB-1 que sirve de base para los ítems comunes (3) que implementa la HMI o interfase con el usuario.
4. Un esquema de interconexión (4), que se relaciona con el diseño mecánico.

El objeto del presente trabajo fue mostrar algunos resultados preliminares de los ensayos de dichos componentes, realizados a través de un “acceso a Laboratorio” del programa ERIGRID, cuyo desarrollo y solicitud de financiamiento fue presentado a inicios de 2018 por el LAAS de la Universidad de Toulouse.

3. DESCRIPCION DE LOS MÓDULOS

Se describen a continuación los módulos Ownwall CC/CC y WindConverter de rectificación activa, que, a diferencia de la placa madre WEMB-01, no fueron presentados en (Alinei y otros, 2016).

3.1. Módulo Ownwall de conversión CC/CC.

El conversor OwnWall es un módulo de potencia bidireccional de 1 kW de potencia nominal y una rama, apto para operación en configuración Buck o Boost (Amaral et al, 2015) (Renius et al, 2014), que implementa mediciones con aislación galvánica y la capacidad de desarrollar diversos algoritmos de control a través de un microcontrolador incorporado. En la figura 4 se aprecia un esquemático de la etapa de potencia de dicho conversor. Como se ve, su arquitectura es sencilla, y su unidad de control es un módulo Arduino Nano de bajo costo soldado a la placa.

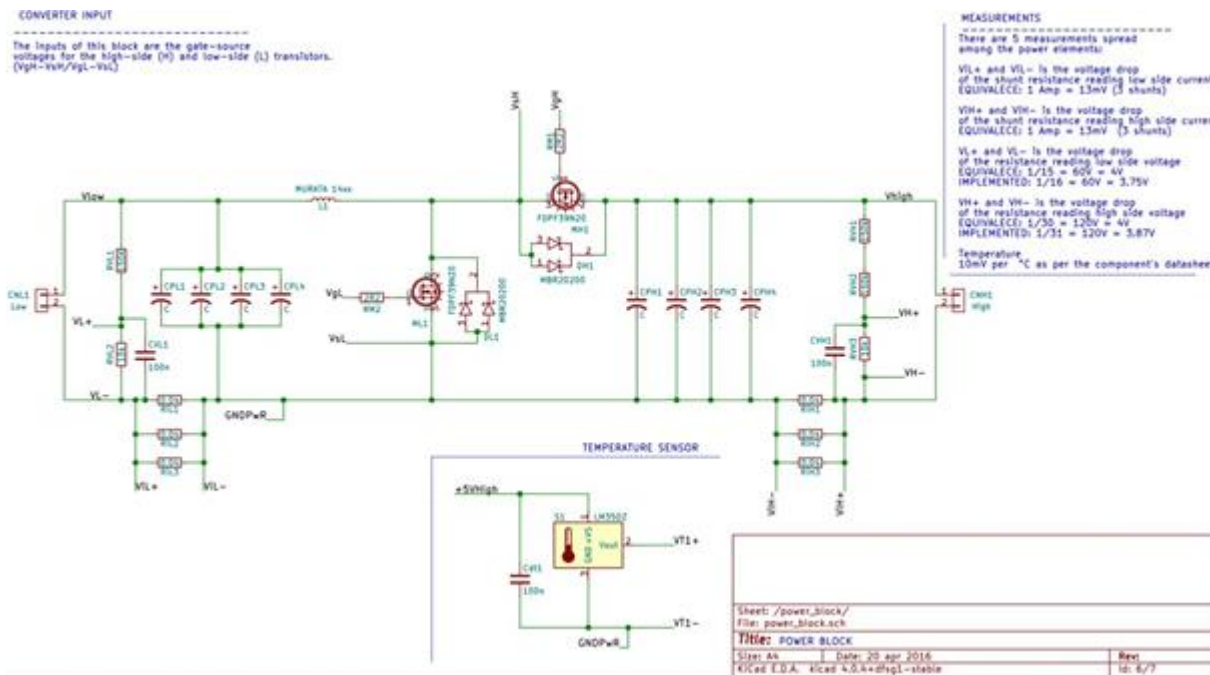


Fig. 4: Diagrama esquemático de la etapa de potencia del módulo Ownwall

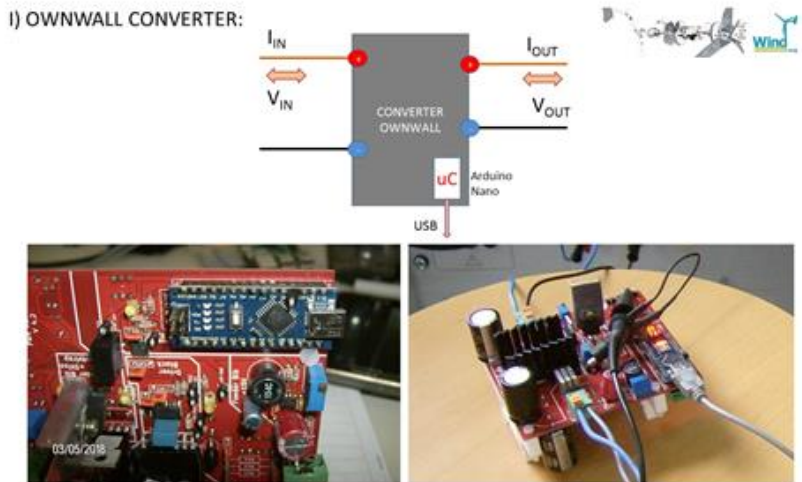


Fig. 5: Fotos y diagrama del módulo Ownwall

Los transistores MOSFET son accionados por un driver IRS2186 (no mostrado), la inductancia L1 tiene un valor de 100 uH lo cual da un tamaño compacto para la potencia del módulo. Para lograr mayor performance, el controlador se programa directamente en C utilizando la cadena de herramientas avr-gcc de uso libre. Los parámetros de operación se almacenan en la EEPROM y pueden modificarse para distintos algoritmos. Para evaluar el módulo en *modo ensayo*, se creó una aplicación Backend en Python para comunicar en bajo nivel con una PC a través del puerto serie (emulado en USB). Dicha aplicación actualiza permanentemente una aplicación Frontend escrita en PHP que provee una actualización permanente de las mediciones internas y status del controlador. En *modo normal*, la conexión serial del Nano se deriva a un convertor RS-485 (debajo del módulo Nano) que se comunica por el bus a una velocidad menor, con la placa madre del Sistema.

3.2. Módulo WindConverter

Tradicionalmente las turbinas eólicas de diseño Piggot (Scoraig, 2016) y otras de baja potencia utilizan un rectificador convencional de seis pulsos (puente Gratz) para convertir la salida variable en tensión y frecuencia del generador trifásico de imanes permanentes en corriente continua. A pesar de que este sistema es confiable y de uso muy extendido, presenta algunas desventajas que pueden ser tratadas con otras configuraciones. Algunas de estas limitaciones son:

1. Necesidad de un control adicional conectado a una Resistencia de Frenado (*Dumpload*), para evitar la sobrecarga del banco de baterías.
2. Falta de control en la tensión de salida, vinculada directamente a la tensión del generador y proporcional al viento.
3. Baja eficiencia por la caída de tensión directa en los diodos, aun utilizando módulos schottky. (por ejemplo, una caída de 0.5 V en cada fase a una corriente típica de 30 A implica una pérdida continua de 45 W para un aerogenerador de 1000 W aproximadamente).

4. No hay posibilidad de optimización aerodinámica o seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para mejorar la eficiencia global de la conversión.

5. Inyección de armónicos a partir de la salida rectificada del generador, produciendo vibraciones y reducción de la eficiencia.

Muchas de estas limitaciones pueden solucionarse a través del principio de rectificación activa. En años recientes, un gran número de aplicaciones industriales utilizan este principio, básicamente para la corrección de factor de potencia (*PFC*), a frecuencias de red convencionales. Otros diseños como los de generadores para aviónica (Uros-UPM, 2014) operan a frecuencias mayores (350 a 800 Hz) y son similares en requerimientos a los de los pequeños aerogeneradores. Estos sistemas se basan en la disponibilidad de controladores con capacidad *DSP* (Procesamiento Digital de Señales) cada vez más económicos y confiables, que permiten implementar complejos cálculos y transformaciones a gran velocidad. En general cuentan con módulos de salida *PWM* (Modulación de ancho de pulso) dedicados para el control de las llaves electrónicas (indicadas como *Sx* en figura 6).

Hay una cantidad de posibles arquitecturas para rectificación activa. En el caso del WindConverter, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Grenoble, se eligió una arquitectura boost de tres fases, como se muestra en la figura 6. Para simplificar el diseño del convertidor, se aplican a las señales adquiridas desde la entrada proveniente del aerogenerador (supuesto un sistema balanceado en secuencia directa) una serie de transformaciones conocidas como $\alpha\beta$ -dq (Uros-UPM, 2014) que permiten obtener una salida tiempo-invariante que se comporta como corriente continua, facilitando el control de potencia activa y reactiva y el diseño del controlador.

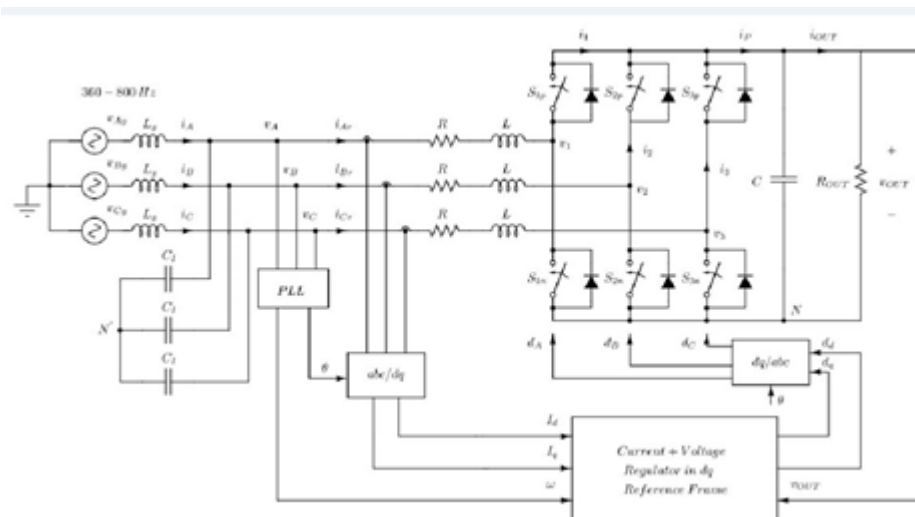


Fig. 6: Diagrama básico de una arquitectura boost para rectificador activo con unidades de control (Uros-UPM, 2014)

La implementación de dicho controlador WindConverter se basó en un controlador dsPIC33 (dsPIC, 2016) y su ensayo se muestran en la figura 7. La etapa de potencia utiliza tres inductores más grandes (470 uH), transistores MOSFET tipo N y tres drivers IR2181S. Debido a problemas de ruido, la

revisión más reciente de la placa para 1 kW incorpora aislamiento galvánico del circuito de CPU con la referencia de potencia.

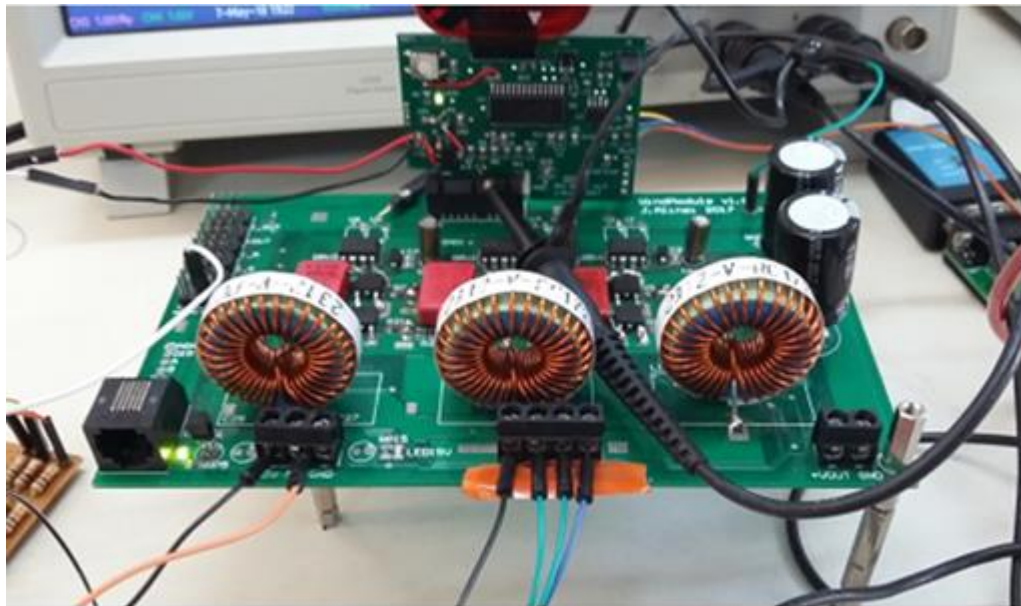


Fig. 7: WindConverter de arquitectura boost para rectificador activo para aerogenerador

4. ENSAYOS REALIZADOS EN ACCESO ERIGRID / NTUA

El programa de Acceso a Laboratorios ERIGRID permite a grupos de trabajo utilizar durante un período determinado laboratorios especializados, para ensayos o experimentos. El ICCS-EESL (ELECTRIC ENERGY SYSTEMS LABORATORY) (Smart Rue, 2018) de la Universidad Técnica de Atenas (NTUA) es uno de los ofertados, y

presenta características y equipamiento muy adecuados para el desarrollo de ensayos en sistemas de corriente continua de potencia baja a media y corriente alterna en conexión a red. Cuenta con sistemas para ensayo de redes aisladas, microrredes y redes inteligentes (figura 8,9), y experiencia de décadas en desarrollos de sistemas de energía aislados con fotovoltaica y eólica (sobre todo abundantes en la región insular del país).

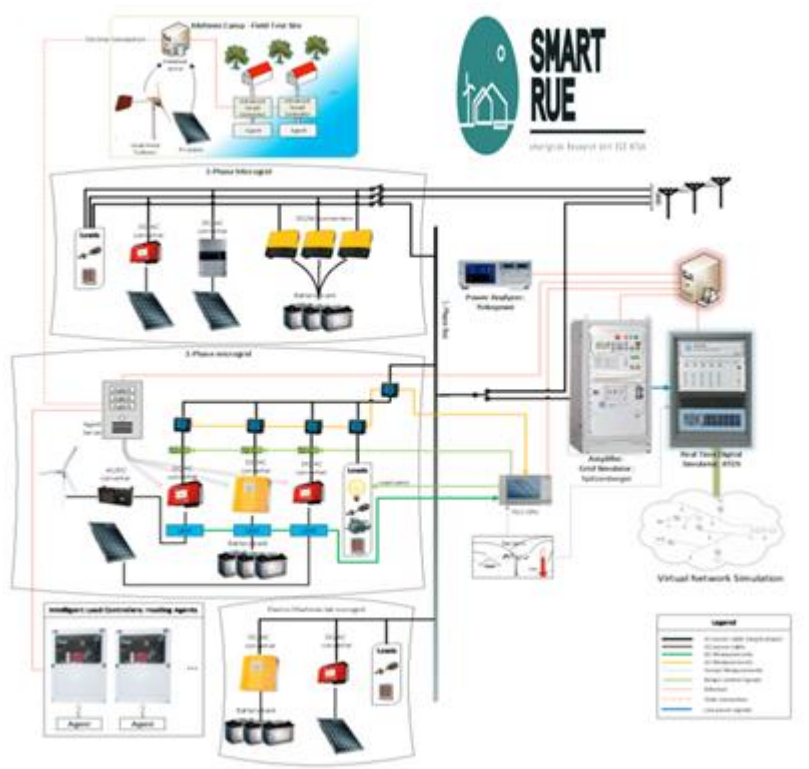


Fig. 8: Diagrama de disponibilidades del Laboratorio ICCS – SmartRue en NTUA.



Fig. 9: Jornadas de preparación en Laboratorio ICCS – SmartRue en NTUA.

A través de la reunión y acceso a laboratorios realizado en mayo 2018 (Erigrd_NTUA, 2018), organizado por el grupo original que trabajó sobre el MPP en la Universidad de Toulouse, se realizaron los siguientes ensayos:

- a) Módulo CC/CC Ownwall como fuente y controlador de carga sobre baterías
- b) Modulo CC/CC Ownwall con algoritmo MPPT
- c) Modulo Ownwall para adaptación de niveles CC/CC
- d) Modulo Ownwall como Inversor
- e) Módulo WindConverter – Rectificador activo
- f) Módulo WEMB-1 Motherboard

a) Ensayo básico de carga de batería de 24 V.

Un diagrama del ensayo a) en configuración cargador de baterías se muestra en figura 10.

La corriente de salida y las potencias de entrada y salida obtenidas se muestra en los gráficos de la figura 11, durante

un ensayo de 23 minutos. La tensión de salida y eficiencia en figura 12.

b) Ensayo de emulación de curva fotovoltaica y conversor con algoritmo MPPT.

El sistema que se ilustra en la figura 13 permite realizar un ensayo (b) controlado de performance de un controlador de tipo MPPT (algoritmo *Climbing-Hill* convencional) para paneles solares, emulando en forma muy precisa la característica tensión-corriente de un panel fotovoltaico para distintos niveles de radiación. Se vale para esto de un equipo RTDS (Real Time Digital Simulator) y una unidad de amplificación PAS5000, ambas conectadas a un software específico de emulación que además registra la salida a través de un instrumento de precisión Yokogawa.

A) BASIC TESTS (02/04-05-2018):

A.2) CHARGER

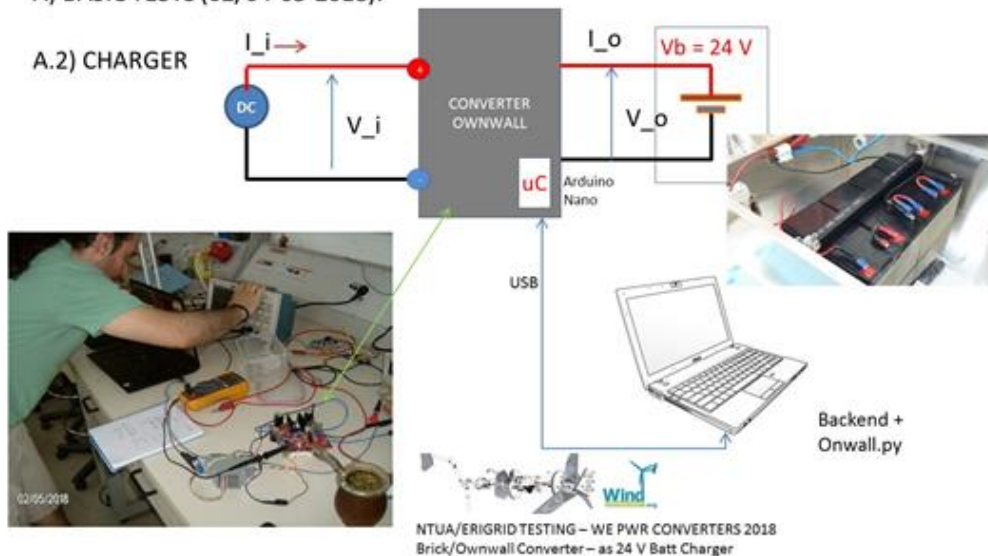


Fig. 10: Ensayo de Conversor CC/CC Ownwall como cargador, realizados en NTUA

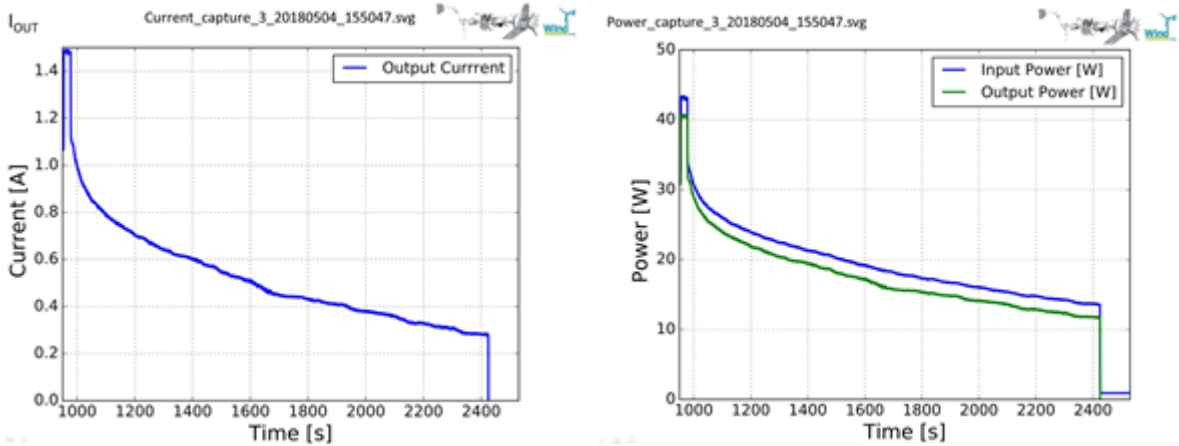


Fig. 11: Corriente de salida en Ensayo, Potencias de Entrada y Salida

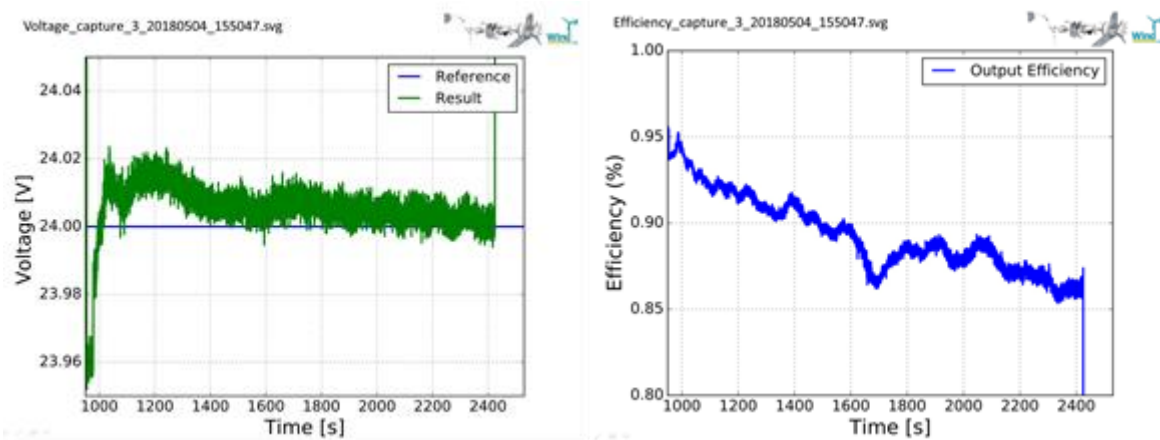


Fig. 12: Tensión de salida sobre batería, y eficiencia medida del convertor Ownwall

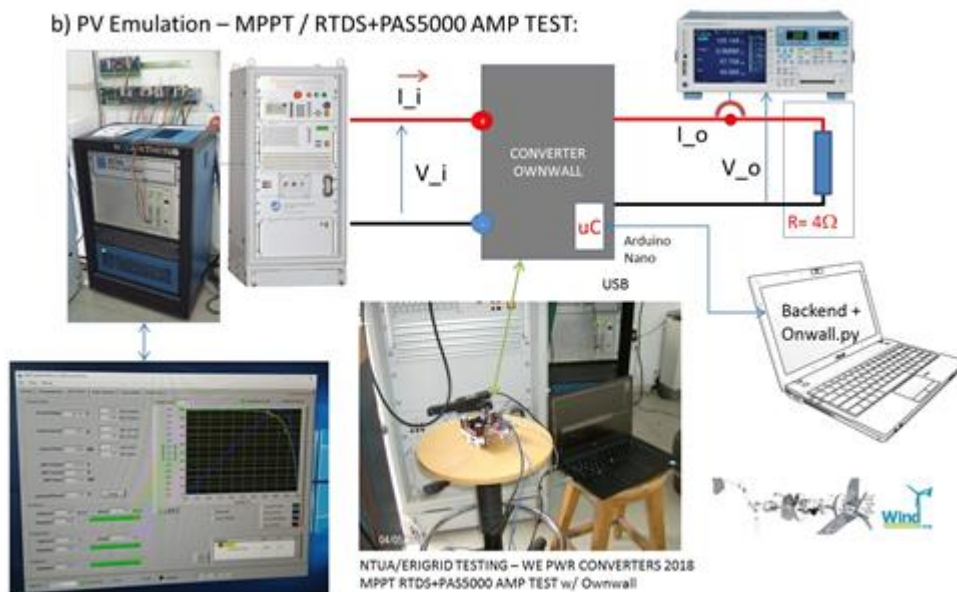


Fig. 13: Ensayo MPPT del convertor Ownwall

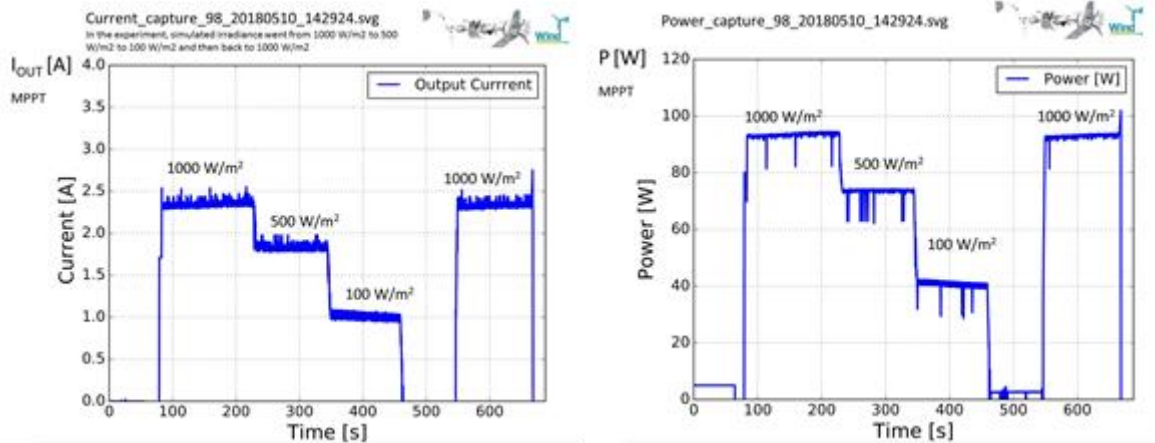


Fig. 14: Curvas de Corriente (i_{zq}) y Potencia (der.) del Ensayo (b) en emulación FV + MPPT

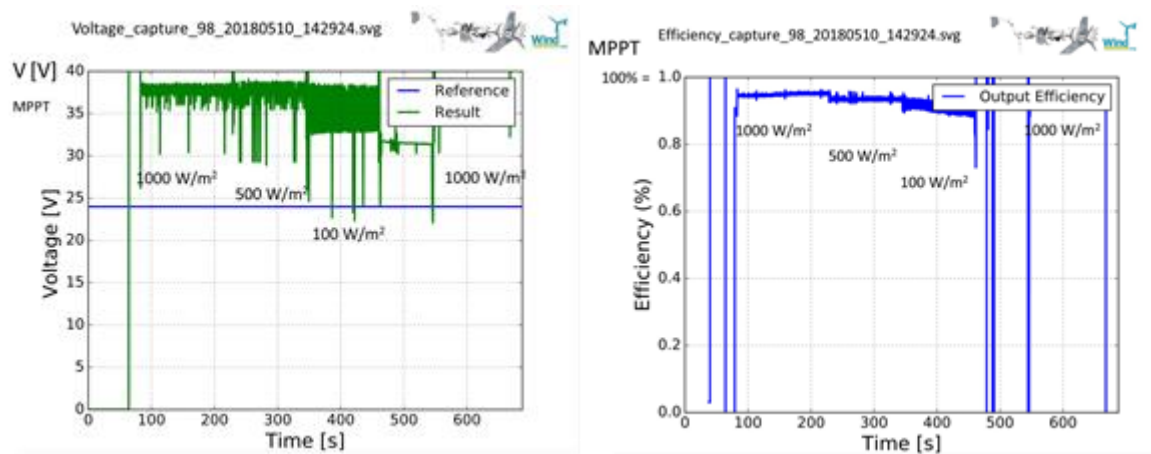


Fig. 15: Curvas de Tensión (i_{zq}) y Eficiencia (der.) del Ensayo (b) en emulación FV + MPPT

En las figuras 14 y 15 pueden apreciarse las mediciones registradas sobre el convertidor en el ensayo MPPT, para distintos niveles simulados de radiación: 1000 W/m², luego

500 W/m², 100 W/m², y finalmente de nuevo 1000 W/m², a lo largo de un ensayo de 10 minutos.

b) Ensayo de bajo nivel del Windconverter (e) con RTDS.

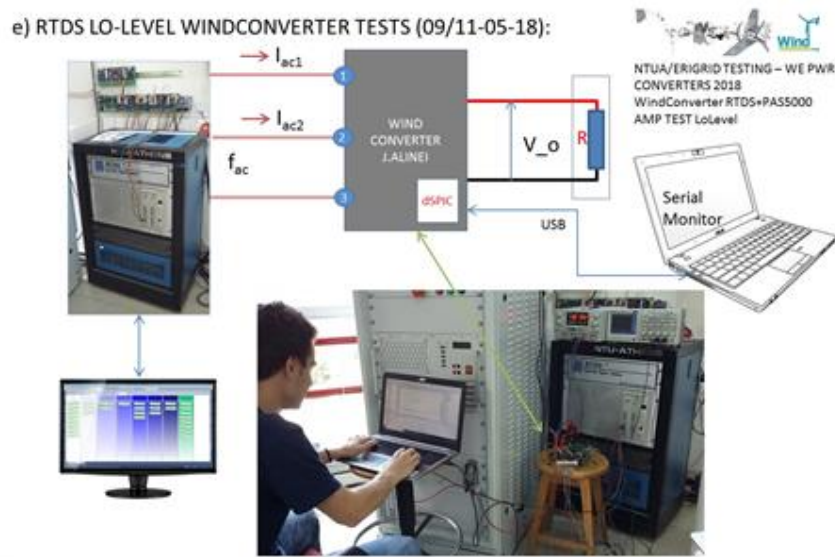


Fig. 16: Diagrama del Ensayo del WindConverter (rectificador activo) con RTDS.

En la figura 16 pueden apreciarse el ensayo de bajo nivel (entradas de tensión limitada) del primer prototipo del WindConverter con RTDS y PAS5000. Los ensayos fueron prospectivos por el desarrollo muy reciente de la placa y la complejidad del software interno, debido a lo cual se realizó sin llegar a niveles de potencia de trabajo normal.

d) Ensayo de comunicaciones placa madre WEMB01 (f) con Ownwall via RS485.

A la prueba se llevaron varias unidades de placas Ownwall y dos unidades de placa Madre WEMB01 (Alinei et al, 2016), por lo cual se pudieron realizar en paralelo con ensayos anteriores varias tareas de preparación de comunicaciones entre dichas placas, y el display que constituirá la interfase con el usuario (HMI) (figura 17) utilizando un Arduino Mega 2560.



Fig. 17: Ensayos de Placa Madre en comunicación con Controlador Ownwall vía RS485 y Display

5. CONCLUSIONES

Se ha podido llevar adelante una serie de ensayos como continuación de un Proyecto iniciado en 2016 (MPP) que buscó desarrollar, a través de la implementación colaborativa, una alternativa de diseño electrónico abierta y pública para convertidores de potencia orientados a energías renovables. Estos ensayos se realizaron en mayo de 2018 a través de un proyecto de la Comunidad Europea (ERIGRID) que otorgó financiamiento para el traslado del grupo a un laboratorio especializado (NTUA / Atenas) con equipamiento específico para ensayar los prototipos convertidores. En el presente trabajo se describieron brevemente los ensayos como continuidad del desarrollo iniciado en 2016, con énfasis sobre los prototipos de conversores CC/CC, rectificador activo trifásico y placa madre de los módulos de electrónica de potencia para energías renovables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Toulouse (LAAS - CNRS), al Instituto Tecnológico de Grenoble, a la Universidad Nacional de la Patagonia Austral y a Nasos Vasilakis, Panos Kotsampopoulos, Marios Maniatopoulos y en general a todos los investigadores de NTUA/ICCS que hicieron posible el desarrollo de las experiencias.

REFERENCIAS

- AEA - UNPA (2018) <https://www.uarg.unpa.edu.ar/index.php/institucional/institutos/11-instituto-ita>
- Alinei J., Oliva R.B., Lavado Villa L., Corica J., Kahn R., Little M. (2016). Proyecto De convertidores modulares de electrónica de potencia para energías renovables. *Actas de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, 08.155-08.165.
- Amaral P., Duarte C. , Costa P. (2015). On the Impact of Timer Resolution in the Efficiency Optimization of Synchronous Buck Converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, **6**, 4, 693 – 702.
- dsPIC33EP (2016) <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/dsPIC33EP256MC202>
- Erigrd (2018) <https://erigrd.eu/transnational-access/>
- Erigrd_NTUA (2018) https://erigrd.eu/wp-content/uploads/2018/04/ERIGrid-RI-Description-Template_NTUA_EESL_F.pdf
- Labor_ICCS (2018) <http://www.iccs.gr/en>
- Modbus, (2014) Modbus.org: <http://www.modbus.org/specs.php>
- Ren21 (2017) Renewables Global Status Report: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf

- Renius J.S., Kumar A.V., Fredderics A., Guru R., Nair S.L. (2014). Modelling of Variable Frequency Synchronous Buck Converter. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, **5**, 2, 237-243.
- Scoraig (2016). – Página de Hugh Piggot: <http://www.scoraigwind.co.uk/>
- SEPS (2016) <http://www.wisions.net/posts/selected-projects-exchange-activities-seps-call-in-latin-america-and-the-ca/page:1#post180>
- Smart Rue (2018) <http://www.smartrue.gr/en/laboratory/laboratory-equipment-and-capabilities/>
- Uros-UPM (2014) U. Borović, “Analysis and Comparison of Different Active Rectifier Topologies for Avionic Specifications”, http://www.cei.upm.es/media/TFM/Borovic_Uros_TFM_2014.pdf
- WE - Wind Empowerment (2016) <http://www.windempowerment.org>