

INFORME DE ACTIVIDADES 2018

Grupo de Estudio Sobre Energía (GESE)

Integrantes:

Director: Ing. Alejandro Blas de Villaflor

Director de proyecto: Mg. Ing. Ruben Domingo Bufanio

Investigadores:

Ing. Javier Rubido (Ingeniería mecánica)

Ing. Ramiro Bracco (Ingeniería aeronáutica) - Hasta Octubre de 2018

Ing. Mariano Flores (Ingeniería aeronáutica) - A partir de Noviembre de 2018

Carlos Stortoni (Ingeniería mecánica)

Ing. Marcelo Gutiérrez (Ingeniería electrónica) - Consultor externo

Proyectos de Investigación y Desarrollo

- PID UTI4726TC, ESTUDIO DE CONTROL DE PASO DE PALA PARA GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA.
- PID TUN4290 Tutorado junto con Facultad Regional Neuquén, CONTROL DE ENERGÍA EÓLICA "WECS PMSG" ON-GRID DE BAJA POTENCIA.

Trabajos y actividades realizadas

PID UTI4726TC

Determinación de las masas y constante del resorte del control de paso de pala centrífugo

Para lograr el objetivo planteado, se partió del esquema del control de paso de pala centrífugo representado en la Figura 1:

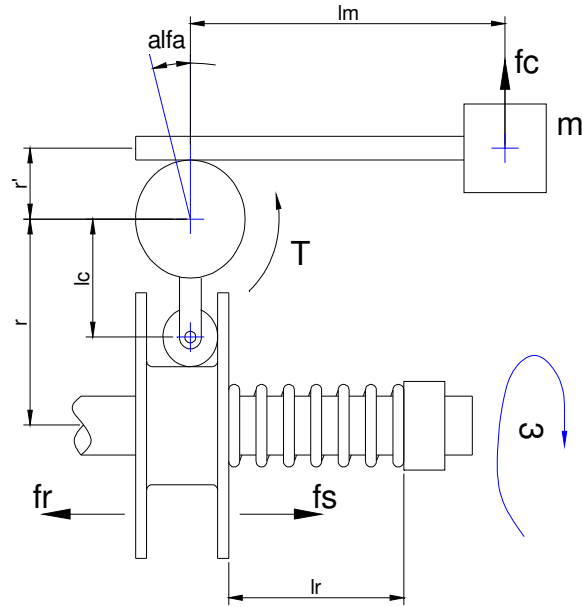


Figura 1. Esquema control de paso de pala centrífugo

Luego mediante un análisis para la condición de equilibrio de momentos, se obtuvo la ecuación (1) donde se relaciona en forma teórica, la velocidad angular del rotor del aerogenerador, en función del ángulo de paso de palas, la constante del resorte, las masas centrífugas y de los parámetros constructivos del sistema de control.

$$\omega = \sqrt{\frac{l_c \times K \times [\Delta l_{r(ini)} + l_c \times \text{sen}(2\alpha)]}{3 \times m \times l_m \times [r + r' \times \cos(\alpha) + l_m \times \text{sen}(\alpha)]}} \quad (1)$$

Dónde:

- ω : Velocidad angular del rotor [rad / s]
- α : Ángulo de paso de pala [°]
- m : Masa centrífuga asociada a cada pala [kg]
- r : Distancia entre el eje del rotor y el eje de cada pala [m]
- r' : Distancia entre el eje de cada pala y el centro del brazo de montaje de la masa centrífuga correspondiente [m]
- K : Constante elástica del resorte [N / m]
- l_m : Distancia del centro del eje de cada pala y el centro de gravedad de la masa centrífuga correspondiente [m]
- l_c : Distancia entre el centro del eje de cada pala y el actuador del sincronizador correspondiente [m]
- $\Delta l_{r(ini)}$: Precarga del resorte [m]

Fabricación del control de paso de pala centrífugo

A partir del estudio de las características electromecánicas del generador y las características aerodinámicas de las palas utilizadas, se determinó una estrategia de control; luego con dicha estrategia y por medio de la ecuación (1) se determinaron los parámetros constructivos principales del control de paso de pala centrífugo, y finalmente con los datos obtenidos se procedió a la fabricación de todas las piezas necesarias para su implementación según se muestra en la siguiente Figura 1:



Figura 2. Piezas mecanizadas del control de paso de pala centrífugo

Teniendo especial cuidado en utilizar cojinetes de bolas radiales y axiales, según corresponda, en todos los mecanismos giratorios y de desplazamiento implementados, con el objeto de minimizar los efectos de rozamientos no tenidos en cuenta en el modelo planteado anteriormente.

Implementación de banco de pruebas

La necesidad de realizar pruebas que permitan ajustar y comprobar la respuesta del sistema de control de paso de palas centrífugo, según la estrategia de control planteada, previas a los ensayos en el túnel de viento, hizo necesaria la implementación de un banco de prueba, en el cual una vez montado el aerogenerador, permitiera por medio de una transmisión a correa, conectada a un motor trifásico de jaula de ardilla de potencia adecuada y asociado a un variador electrónico de velocidad, como se ilustra en la Figura 3, realizar los ensayos y ajustes previos.



Figura 3. Banco de pruebas implementado

En la Figura 4 se muestran los resultados finales de los ensayos y ajustes efectuados en el banco de pruebas comparados con la curva objetivo.

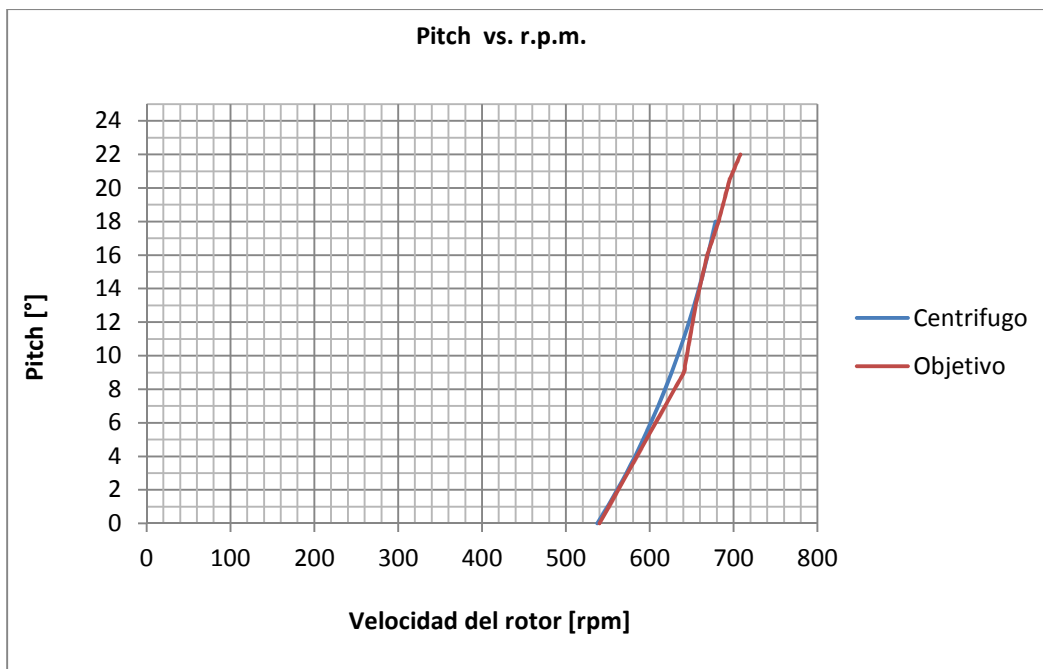


Figura 4. Pitch vs. Velocidad del rotor

Pruebas en túnel de viento

Finalizados los ensayos y pruebas en el banco de prueba, se procedió a realizar ensayos con viento, disponiéndose, según se muestra en la Figura 5, del montaje necesario en la boca del túnel de viento con que cuenta la facultad.

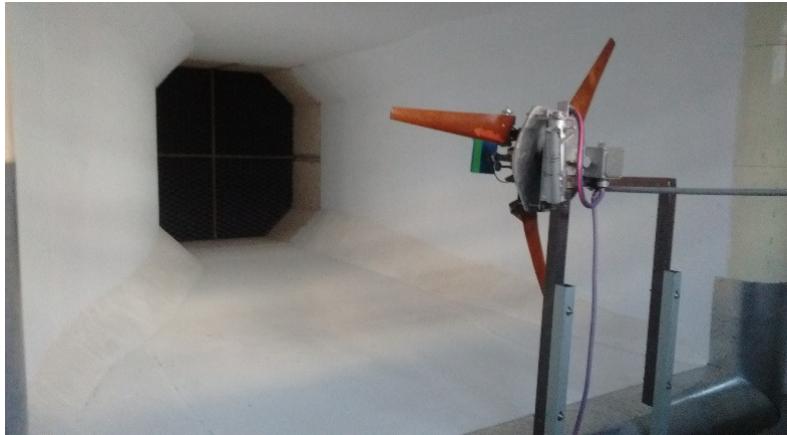


Figura 5. Montaje del aerogenerador en la boca del túnel de viento

Gracias a dicha posibilidad pudieron hacerse una gran cantidad de pruebas donde se combinaron distintas velocidades de viento con diferentes tipos de cargas conectadas al generador, tanto de carácter resistivas como carga de baterías en forma separadas y simultáneas; siendo analizadas cada una con y sin la acción del control centrífugo.

A continuación, en la Figuras 6, se muestran dos curvas de respuesta, una con y otra sin la acción del sistema de control de paso de pala centrífugo implementado, donde se puede apreciar la acción de dicho control.

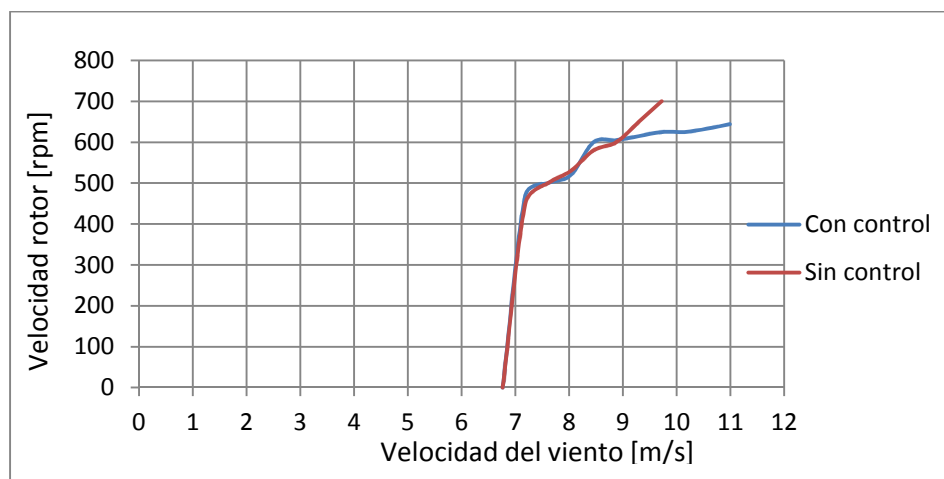


Figura 6. Velocidad del rotor vs. Velocidad de viento

Modelización dinámica del sistema electro productor

En vista de proponer mejoras y observar el comportamiento del sistema aerogenerador frente a diferentes variables de desempeño, se realizó una modelización, y luego simulación del sistema físico del rotor, generador eléctrico y sistema de carga. En la siguiente Figura 7 se muestra el modelo gráfico, utilizado en las simulaciones, del comportamiento del rotor Piggott, extraído del aplicativo Qblade, el cual entrega el coeficiente de potencia “ C_p ” respecto de “ λ ” (relación de velocidades en punta de pala) y “ β ” (paso de pala o pitch). Se hizo lo mismo, según ecuación de equilibrio de punto 2.1, el “Tool Box” de respuesta del sistema centrífugo, con datos de masas, constante de resorte y precompresión, como principales. Mismo según desarrollo indicado en punto 2, se modeló el generador eléctrico (PMSG) con los datos constructivos de flujo de enlace, constantes de voltaje de línea vs rpm, torque vs amperes, número de pares de polos, con el agregado necesario del momento de inercia total más fricción viscosa (incluido rotor completo), todo lo anterior mostrado en Figura 8 junto a un modelo de alimentación de carga a través de puente completo a diodos rectificador.

Luego en Figuras 9 (a y b) de más abajo se muestran los resultados de las simulaciones dinámicas a través de las curvas de paso de pala en función de la velocidad de giro del aerogenerador, como de esta en función de la velocidad del viento. Se ve claro la acción reguladora del control centrífugo, según objetivo, con vientos variando entre aproximadamente los 8 m/s y 15 m/s, con comportamiento similar al mostrado en las pruebas de banco de pruebas y túnel de viento.

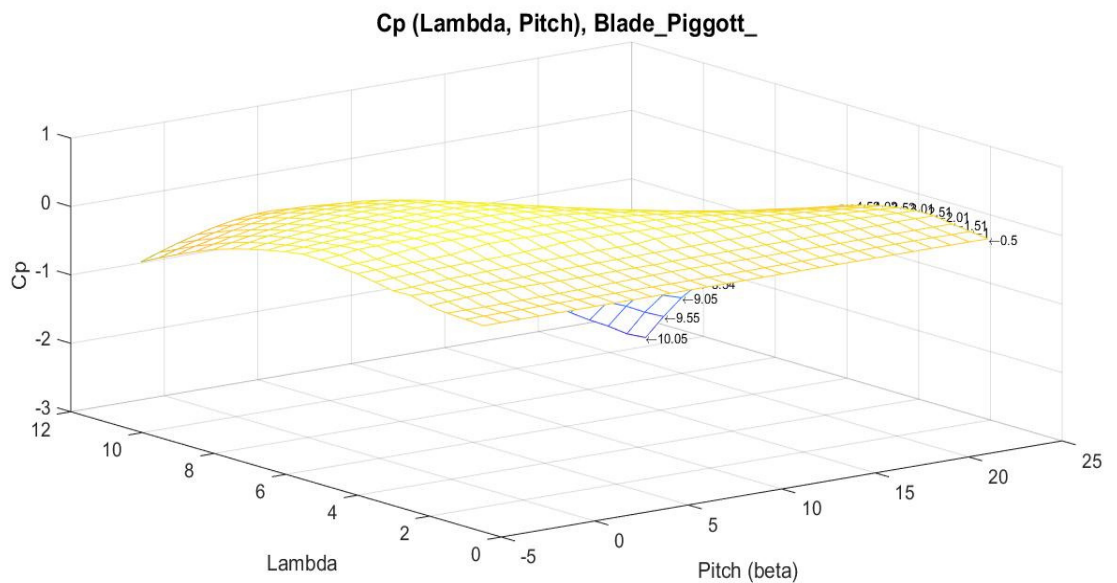


Figura 7. Gráfica de coeficiente de potencia, C_p , del sistema de palas según geometría propuesta por Piggott.

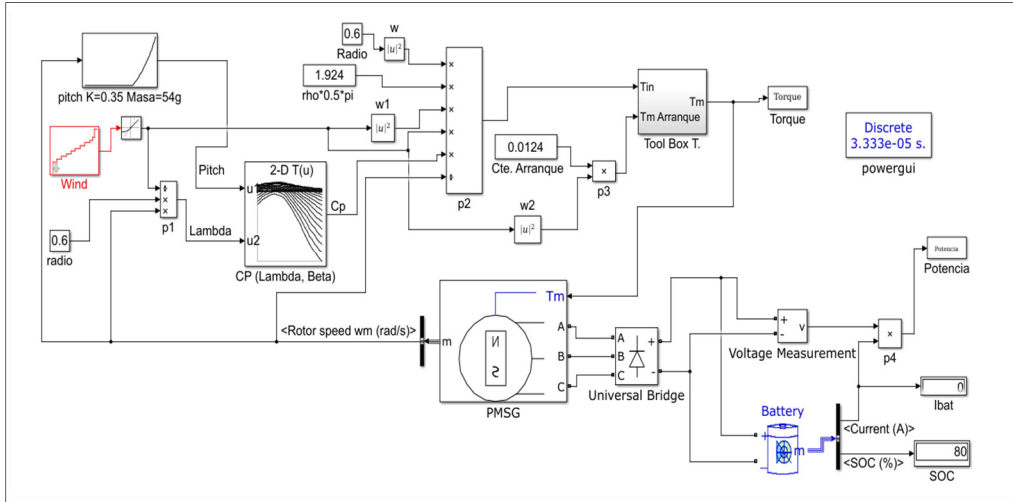
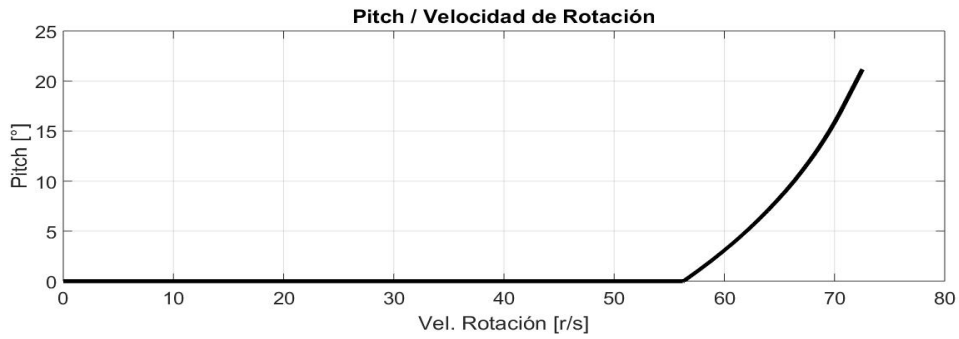
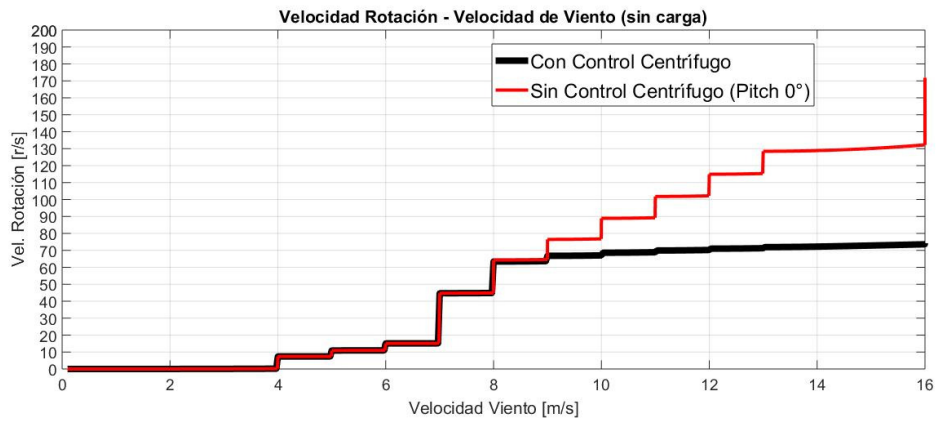


Figura 8. Modelo de simulación del sistema electro productor



a)



b)

Figura 9. a) Acción control de paso de pala por acción centrífuga en función de la velocidad de rotación, b) Comparación de la acción de control de velocidad / potencia por paso de pala versus sin control respecto de la velocidad del viento.

Rediseño del perfil aerodinámico de las palas

Dado que el diseño original de las palas tiene como objetivo principal, lograr la máxima simplicidad a la hora de construirlas, su geometría no es lo suficientemente idónea para la aplicación en la que son utilizadas. Por tal motivo, y para mejorar su desempeño es que se plantearon las siguientes pautas de diseño:

- Perfil con buena performance a bajo Re (300000)
- Perfil de raíz 20 a 23% de espesor relativo
- Perfil de Puntera 12 a 15% de espesor relativo
- Alto C_{lmax}
- Entrada en pérdida suave
- Baja sensibilidad a la rugosidad
- El perfil de la puntera y el de raíz deben ser compatibles
- Alto C_l/C_d max
- Alto C_l/C_d max con transición forzada

Con dichas pautas se utilizó el software libre Qblade para analizar distintos tipos de perfiles típicamente desarrollados para su utilización en aerogeneradores, y luego se compararon los resultados para la selección del perfil más idóneo en dos configuraciones, transición libre y transición forzada para estudiar las características de los perfiles frente a una alta rugosidad que en la práctica se da por el impacto de los insectos y la erosión sobre todo en el borde de ataque de las palas. Como resultado del análisis, se seleccionaron para la confección de la pala los perfiles, NREL S823 para la raíz y el S822 para la puntera, los cuales presentan buenas características según los objetivos planteados.

Para el nuevo diseño de las palas, ilustrado en la Figura 10, también se utilizó el software libre Qblade con los perfiles seleccionados, obteniéndose a través de dicho programa, todos los datos necesarios para su fabricación.

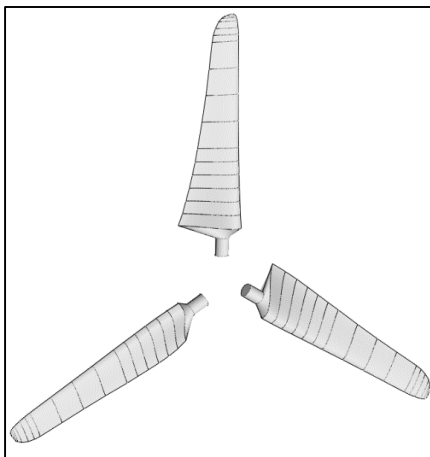


Figura 10. Nuevo diseño de palas

Fabricación de palas

En la actualidad se está estudiando la posibilidad de fabricar dichos elementos por medio de impresión 3D, ya sea en una sola pieza o en varios tramos ensamblados. Dicho estudio actualmente se encuentra en un considerable grado de avance, habiéndose logrado imprimir prototipos a escala, según se muestra en la Figura 1, lo cual permitirá en un futuro cercano, la fabricación de elementos de alta complejidad, a un bajo costo y con muy buena exactitud respecto a sus características y repetibilidad.



Figura 11 *Impresión de palas 3D*

PID TUN4290

El desarrollo del presente proyecto está a cargo de a la UTN regional Neuquén y Haedo.

Participantes por la regional Neuquén:

Ruben Domingo Bufanio
Damian Marasco
Juan Manuel González
Gustavo Monte
Norberto Scarone

Participantes por la regional Haedo:

Alejandro Blas de Villafior

Ramiro Bracco

Introducción

El sistema de conversión aplicado a un generador sincrónico de imanes permanentes (PMSG) surge de los desarrollos en generación eólica en grandes potencias como lo indican las tendencias. Utiliza un sistema de conversión completa como el indicado en la Figura 12 de manera de desvincular generación y frecuencia variable como es la del (PMSG), alimentando a una demanda con características del producto técnico en valores dentro de límites impuestos por las recomendaciones y normas.

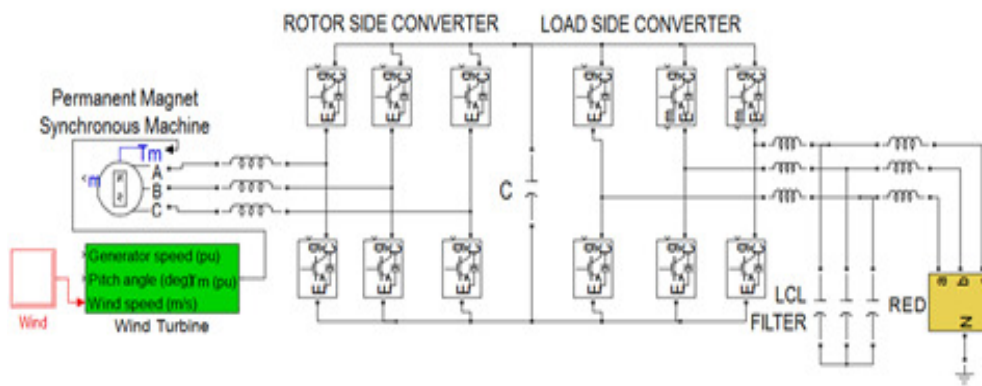


Figura 12 Diagrama simplificado, Full-Converter con tecnología espalda con espalda (back to back), empleado en el modelo.

Dentro del esquema de conversión de potencia el rotor side converter cumple la función de maximizar captura de energía del viento por parte del rotor, controlando flujo de potencia hacia el lado carga y velocidad de giro óptima.

Estrategia de control lado rotor

El generador PMSG puede ser controlado por diversos métodos, se opta en este trabajo dado su buen desempeño y facilidad de modelado por el ZDC, (figura 13), donde las tres corrientes de fase estática, en el marco de referencia estacionario, son transformadas en uno de referencia sincrónico rotante a la pulsación de giro de la máquina sincrónica multiplicada por el número de pares de polos.

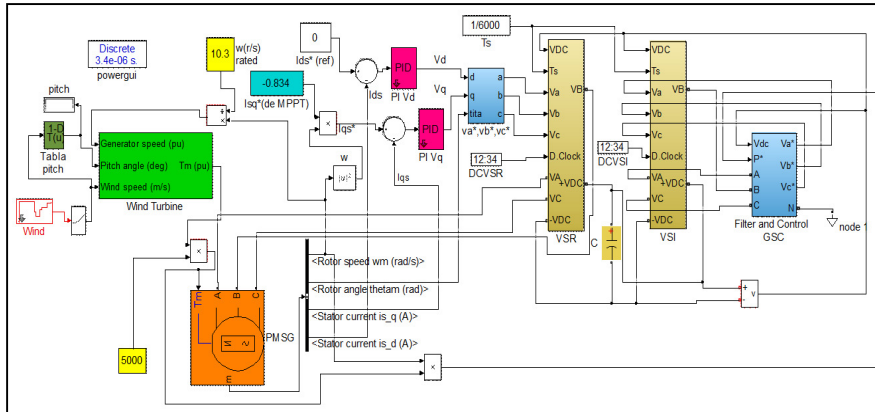


Figura 13 Control ZDC para conversión de energía eólica "WECS"

Estrategia de control para la inyección de potencia y control de reactivo con la red

Para el control de la inyección de energía a la red, (figura 14), se parte de considerar, a la frecuencia fundamental (50Hz), un esquema compuesto por dos espacios vectoriales de tensión, el de salida del inversor como la referencia a obtener y la red en el PCC en serie con un filtro L-R, donde la inductancia es la suma de las correspondientes del filtro L-C-L.

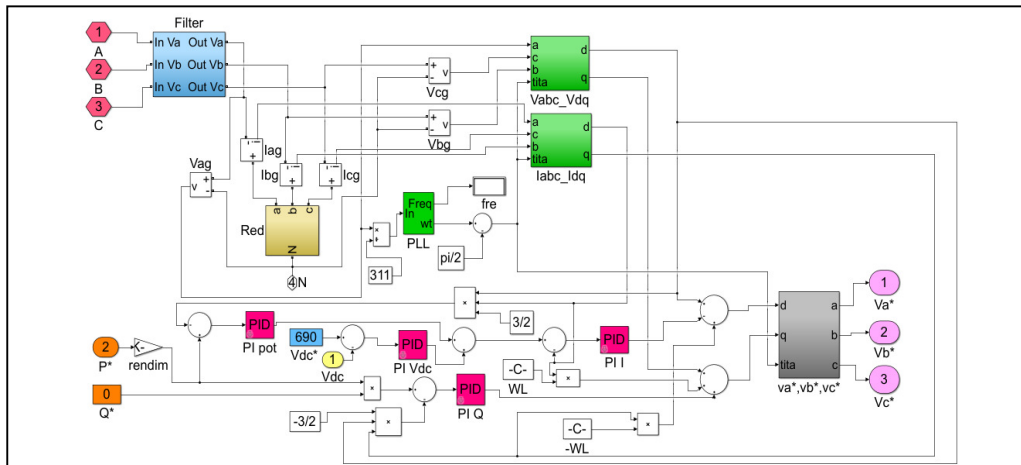


Figura 14 Diagrama lado Red con estrategia de control VOC a lazo cerrado en el marco sincrónico, y obtención de las señales de referencia para la modulación SVM del convertidor GSC (grid side converter).

Desarrollo experimental

En base a los resultados obtenidos a través del modelado y simulación se comenzó, en principio, con el desarrollo del inversor lado red (escalado a 1 kW de potencia), para ello se implementó un microcontrolador STM32F767 (ARM Cortex-M7, 32bits, 216MHz) que gestiona la modulación vectorial (SVM) entre otras tareas de control.

El microcontrolador se encarga de generar las señales PWM para los disparos de los IGBTs del inversor a partir del procesamiento de las señales de referencia V_a^* , V_b^* y V_c^* , y de la tensión del bus de continua V_{dc} . Como se muestra en la figura, aplicando la transformada de Clark (abc/alpha-beta) a las tensiones de referencia V_a^* , V_b^* y V_c^* se obtienen las componentes **alpha** y **beta** usadas para calcular el índice de modulación de amplitud “**ma**”, el número de sector “**K**”, y los tiempos **Ta**, **Tb** y **To**. Estos cálculos se realizan en tiempo real con una frecuencia de 6000 Hz, es decir, cada $T_s = 1/6000\text{Hz} = 166.6'$ microsegundos. Una vez obtenidos los tiempos T_a , T_b , T_0 y el número **k**, se calculan los ciclos de actividad (indicados en la figura como Duty Cycle A, B y C) que el periférico TIM1 del microcontrolador convierte en señales PWM complementarias y con inyección automática de Dead-Time. En la siguiente figura 15 se muestra la propuesta.

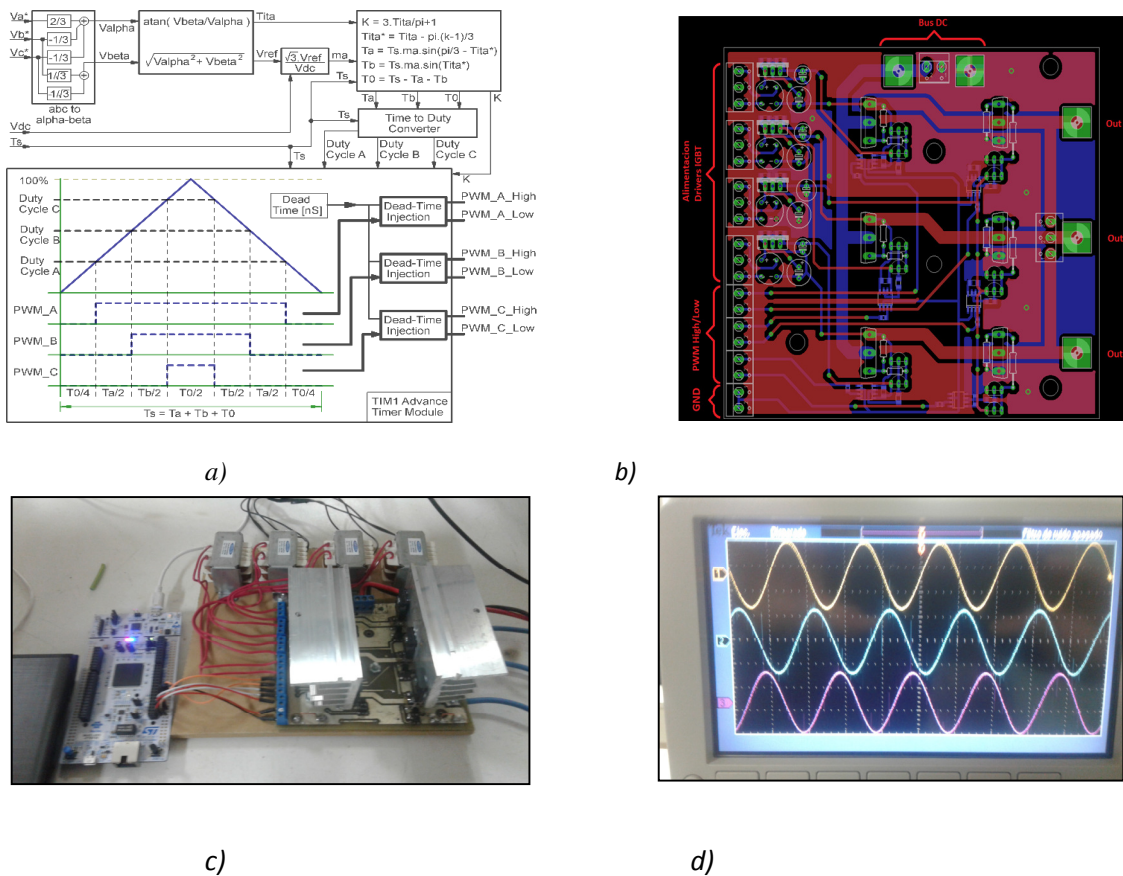


Figura 15, a) Estrategia de implementación algoritmo de modulación SVM, b) Board inversor bidireccional, c) Prototipo experimental, d) Salidas de tensión filtradas sobre una carga resistiva

Fabricación banco de pruebas

El hecho de realizar pruebas que permitan ajustar y comprobar la inyección de tensión a la red, hizo necesaria la implementación de un banco de prueba, en el cual una vez montado el generador, permitiera por medio de una transmisión a correa, conectada a un motor trifásico de jaula de ardilla de potencia adecuada y asociado a un variador electrónico de velocidad, permitiera realizar los ensayos y ajustes necesarios. El avance de la fabricación del mencionado banco de pruebas es el que se ilustra en la figura 16.



Figura 16 Banco de pruebas

Participación en congresos y seminarios

Evento	Organizó	Trabajo presentado	Fecha de realización	Lugar de realización
Congreso Argentina Wind Power 2018	Global Wind Energy Council (GWEC).	DISEÑO AERODINÁMICO DE GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA	06 y 07 de 2018.	Universidad Católica Argentina, CABA, Argentina.
1 ^{er} Congreso Sobre Medios de Transporte y sus Tecnologías Asociadas	UTN Facultad Regional Haedo.	DISEÑO AERODINÁMICO DE GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA	26, 27 y 28 de Septiembre de 2018.	UTN Facultad Regional Haedo, Buenos Aires, Argentina.
3er Congreso de Energías Sustentables de Bahía Blanca	UTN Facultad Regional Bahía Blanca y la Universidad Nacional del Sur.	ESTUDIO DE CONTROL DE PASO DE PALA PARA GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA, UTI4726TC	17, 18 y 19 de Octubre de 2018.	UTN Facultad Regional Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

3er Congreso de Energías Sustentables de Bahía Blanca	UTN Facultad Regional Bahía Blanca y la Universidad Nacional del Sur.	CONTROL DE ENERGÍA EÓLICA "WECS PMSG" ON-GRID DE BAJA POTENCIA, TUN4290	17, 18 y 19 de Octubre de 2018.	UTN Facultad Regional Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
Jornadas científico-técnicas REGEDIS	CYTED PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO.	ESTUDIO DE CONTROL DE PASO DE PALA PARA GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA, UTI4726TC	24 y 25 de Octubre de 2018.	CEDER-CIEMAT, ciudad de Soria, España
Jornadas científico-técnicas REGEDIS	CYTED PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO.	CONTROL DE ENERGÍA EÓLICA "WECS PMSG" ON-GRID DE BAJA POTENCIA, TUN4290	24 y 25 de Octubre de 2018.	CEDER-CIEMAT, ciudad de Soria, España
VII Seminario Nacional de Energía y su Uso Eficiente	UTN Facultad Regional Tucumán, Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado del Rectorado de la UTN, Programa de Energía de la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado del Rectorado de la UTN.	ESTUDIO DE CONTROL DE PASO DE PALA PARA GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA, UTI4726TC	15 y 16 de Noviembre de 2018.	UTN Facultad Regional Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina.

Ing. Alejandro Blas de Villafior
Director del GESE FRH