

JORGE ESTEBAN RODAS BENÍTEZ

**Nuevos enfoques para la generación distribuida basados en sistemas de
energía eólica y solar fotovoltaica**

Monografía presentada al Eco-Lógicas: Concurso Mercosur
de Monografías sobre Energías Renovables y Eficiencia
Energética, auspiciado por el Instituto IDEAL.
Orientador: Profesor Dr. Ing. Raúl Gregor.

Departamento de Sistemas de Potencia y Control
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Asunción
Campus Isla Bogado - Luque, C.P. 2060, República del Paraguay
email: jrodas@ing.una.py, rgregor@ing.una.py

2013

Resumen

La región enfrentará durante la próxima década un nuevo entorno internacional en materia energética impulsado por un cambio estructural en la demanda de energía global como consecuencia del desarrollo económico acelerado de países industrializados y de economías emergentes. El rol de América Latina en este sentido no se encuentra disociado de la tendencia progresiva hacia la consolidación de un nuevo régimen internacional para combatir el cambio climático y en consecuencia se prevé una expansión en el uso y las aplicaciones de nuevas tecnologías que colaboren a la mitigación de los problemas asociados al cambio climático. En este contexto, el presente trabajo aborda el desarrollo y la implementación de nuevos enfoques para la generación distribuida basados en sistemas de energía eólica y solar fotovoltaica, haciendo especial énfasis en el aumento de la eficiencia de los sistemas de generación desde una perspectiva proactiva proponiendo así nuevas tecnologías que permitan asegurar energía limpia y un desarrollo sostenible.

***Palabras Claves:* Generación distribuida, Energía eólica, Energía solar fotovoltaica.**

Abstract

In the next decade, the region is going to face a new international context regarding the energy demand, promoted by a structural change in the global energy demand as a consequence of the economic development in industrialized countries and those of emerging economies. Latin America's role concerning that is not dissociated from the progressive trend towards the consolidation of a new international framework against the climatic changes, and according to that, is foreseen an expansion in the usage and application of new technologies that collaborates to the mitigation of the problems associated to climatic changes. In this context, the present work intends for development and implementation of new approaches for distributed energy generation based on wind and photovoltaic power systems, making a special emphasis on increasing the efficiency of generation systems from a proactive perspective, by proposing new technologies that allows to guarantee clean energy and a sustainable development.

***Index Terms:* Distributed generation, Wind Energy, Photovoltaic solar energy .**

ÍNDICE GENERAL

1. Justificación y Metodología	3
1.1. El escenario energético actual de las ER en Paraguay	3
1.2. Metodología	4
2. Energía eólica basada en generadores multifásicos	4
2.1. Análisis mediante simulaciones	6
2.2. Diseño de la plataforma de ensayo experimental	7
2.3. Generación eólica	10
2.3.1. Análisis de eficiencia mediante simulaciones	10
3. Generación de energía solar fotovoltaica	11
3.1. Simulación de las prestaciones dinámicas del PSF ZDNY-100C36	12
3.1.1. Esquema de conexión en Paralelo	12
3.1.2. Esquema de conexión Serie - Paralelo	13
3.2. Diseño e implementación de la estructura de dos grados de libertad	14
3.2.1. Implementación y montaje	15
3.3. Energía solar fotovoltaica	15
4. Sistema de generación distribuida	17
5. Conclusión	18
BIBLIOGRAFÍA	19

1. Justificación y Metodología

El interés en la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables (ER) ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, justificado principalmente por el reducido impacto generado al medio ambiente. El esfuerzo investigador en esta área es atribuido (por muchos autores) a la incipiente inversión propiciada por una política energética impulsada inicialmente mediante el primer periodo del Protocolo de Kyoto que ha obligado a los países ratificantes a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2012, en un 5,2 % de media anual, en relación con el nivel base de 1990 [NU, 1998] y que recientemente se ha consolidado en un segundo periodo de vigencia comprendido entre el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020, donde se han marcado metas concretas enfocadas en la canalización de financiamiento y tecnologías de apoyo a países en desarrollo, lo cual resulta sin duda un claro proceso de consolidación progresiva de un nuevo régimen internacional para hacer frente a la problemática que implica el cambio climático. Si bien estudios recientes han demostrado que América Latina tiene poco peso en las emisiones globales de CO₂ asociadas al sector energético (3.5 % al 2005), y no se proyectan grandes variaciones en esta participación de la región en los escenarios disponibles 2005-2030, Las oportunidades en América Latina y el Caribe para contribuir al escenario de mitigación del cambio climático global se concentran, por un lado, en la mejora de la eficiencia en el uso de energía en todos los sectores (generación eléctrica, transporte, industrial, edificaciones etc.) y por otro, en la participación proactiva en el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías que permitan mitigar el cambio climático, asegurar energía limpia y un desarrollo sostenible. En este contexto, el presente trabajo aborda el desarrollo de nuevas tendencias en sistemas de generación, tanto eólicos como solares fotovoltaicos desde el punto de vista técnico, con la proyección del uso de estos en sistemas bajo el concepto de generación distribuida a ser aplicados concretamente en la República del Paraguay.

1.1. El escenario energético actual de las ER en Paraguay

En la República del Paraguay, la Ley N° 3.009 promulgada en el año 2006 crea el marco legal que regula la producción y transporte independiente de energía eléctrica (PTIEE) que fomenta entre otras cosas, la generación de energía eléctrica mediante ER tales como la eólica, solar, hidráulica, biomasa e hidrógeno. Estudios previos de viabilidad publicados por el Vice Ministerio de Minas y Energías (VMME) y las proyecciones en el marco del plan estratégico del sector energético de la República del Paraguay (2004-2013), han demostrado que una parte importante de la matriz energética Nacional, puede ser potenciada por un lado por sistemas de generación eólicos, identificándose las regiones de mayor potencial el norte del chaco, el eje noreste-este-sureste de la región oriental y el suroeste de la misma, y por otro por sistemas solares, reportándose incluso varias experiencias centradas en el aprovechamiento de la energía solar pasiva, sin embargo, se ha demostrado que el Paraguay cuenta con grandes potenciales para el uso fotovoltaico; justificado principalmente en función de la radiación que recibe de la luz del Sol, sobre todo en la región occidental y norte, debido a la gran uniformidad en términos geográficos de los niveles de radiación solar y rangos de intensidad que alcanzan valores pico de más de 6,0 kWh/m² por día, con un promedio diario próximo a los 4.5 kWh/m². Estos datos demuestran que la energía solar disponible en el país es abundante y de niveles aptos para la aplicación fotovoltaica [VMME, 2005].

Impulsados por el escenario energético actual (escasamente diversificado a nivel Nacional) y las predicciones realizadas por el VMME que prevé por un lado, un aumento del 300 % para el año 2013 en la producción de energía eléctrica con respecto a la producción Nacional realizada en el año 2008 si se considera como medio de producción la eólica, y por otro la puesta a punto de instalaciones de energía solar fotovoltaica para el suministro eléctrico en zonas de difícil acceso de la red de distribución, donde se ha proyectado la instalación de 40 kW durante los años 2008-2013 con una producción estimada en el año 2013 de 60 MWh [VMME PESE, 2005]. Se detecta la necesidad de investigar soluciones avanzadas a problemas asociados con la maximización de la eficiencia energética tanto de los sistemas eólicos como los solares fotovoltaicos, bajo el concepto de generación distribuida que contribuyan al proceso de mitigación del problema asociado al cambio climático.

1.2. Metodología

El trabajo aborda el desarrollo de nuevas tendencias en el uso y las aplicaciones de las ER, tomado como punto de partida dos vertientes complementarias bajo el concepto de la generación distribuida; el sistema eólico basado en el generador multifásico (más de tres fases) y el sistema solar fotovoltaico. La problemática global que contiene este trabajo se acota mediante un estudio, centrado en el análisis y la evaluación de los generadores de inducción multifásicos (GIM) orientados a aplicaciones de ER, mediante el diseño e implementación de una bancada de ensayos experimentales que permita emular un sistema de generación de energía eléctrica, y que a su vez permita investigar diferentes algoritmos de control en tiempo discreto enfocados en la mejora de la eficiencia energética del sistema de generación mediante el diseño de algoritmos cuyas consignas de control se enfocan en alcanzar el punto de máximo seguimiento de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) que garantizan el máximo aprovechamiento energético, abordando luego el diseño y la puesta a punto del sistema solar fotovoltaico, haciendo especial énfasis en la maximización de la eficiencia mediante el control de posición de una estructura soporte de dos grados de libertad. Cabe mencionar en este punto que la cuantificación de los resultados obtenidos en términos de potencia generada, correlacionada con datos meteorológicos de irradiación solar, temperatura, humedad, viento, etc. pretenden ahondar los conocimientos sobre el “estado del arte” a nivel local, con vista a la futura implementación de sistemas de generación solar fotovoltaico y eólico, por un lado, en comunidades aisladas donde no llega el tendido eléctrico del Sistema Interconectado Nacional (SIN), y por otro, como una alternativa sostenible enfocada en la diversificación de la matriz energética actual.

Los objetivos del presente trabajo se resumen en los siguientes puntos:

- a. El desarrollo del modelo matemático y de simulación del sistema de generación de energía eléctrica basados en sistemas eólicos y el diseño a nivel de prototipo, de una bancada de ensayos experimentales que permita evaluar sobre un sistema real los algoritmos de control propuestos
- b. El desarrollo del modelo matemático y de simulación del sistema de generación de energía eléctrica basados en sistemas solares fotovoltaicos y el diseño, implementación y montaje de la estructura de dos grados de libertad que permita validar los resultados de simulación obtenidos previamente
- c. Potenciar la diversificación de la matriz energética del Paraguay, fomentando el uso de fuentes de energías renovables (en particular la energía solar fotovoltaica y eólica) y la búsqueda de soluciones no convencionales asociadas a la maximización de la eficiencia energética
- d. La búsqueda de estrategias de minimización de armónicos y de control de potencia activa y reactiva, orientada a la interconexión de los sistemas de generación al Sistema Interconectado Nacional (SIN)

Este trabajo es dividido en cuatro apartados principales. El primero, introduce el generador multifásico, citando las ventajas que justifican su utilización en aplicaciones de ER y se presenta resultados de simulación del accionamiento de seis fases. El segundo apartado muestra los resultados de simulación de la turbina eólica y el diseño de la plataforma de ensayo experimental para la extracción de resultados experimentales. El tercer apartado se centra en los resultados de simulación de los distintos esquemas de conexión de los paneles solares fotovoltaicos (PSFs), así como el diseño e implementación de la estructura de dos grados de libertad para su aplicación. Se propone la utilización del control predictivo basado en el modelo (MBPC, por sus siglas en inglés) para el desarrollo de este trabajo. En el siguiente apartado se desarrollan dos métodos de control de velocidad enfocados en alcanzar el MPPT, basados en el estimador de *Luenberger* y el Filtro de *Kalman*, respectivamente. Posteriormente, se aborda el sistema completo y se proponen dos métodos de control de corriente como paso previo al control de la potencia activa y reactiva entregada a una carga trifásica. Finaliza el trabajo con las conclusiones más relevantes del mismo.

2. Energía eólica basada en generadores multifásicos

Las máquinas multifásicas han sido recientemente propuestas en diversas aplicaciones debido a las importantes ventajas que ofrecen; reducción de armónicos de corriente, mejor distribución de la potencia por cada una de las fases, aumento de la fiabilidad) y hacen de este tipo de máquinas una opción bastante interesante para aprovecharlas en aplicaciones donde se requiera elevada potencia. Aunque el análisis y

las aplicaciones sobre máquinas multifásicas se remontan a los años 1920, el desarrollo y las investigaciones tuvieron un crecimiento considerable a comienzos siglo [Levi, 2008]. Esto se debió en gran parte al importante aumento en la capacidad de procesamiento de datos de los dispositivos electrónicos digitales, que permiten implementar estrategias de control sobre estos sistemas (poco convencionales y complejos). Algunas soluciones asociadas a las máquinas multifásicas que reportan en la literatura, tomando como base la solución trifásica son:

- *Disminución de la corriente que circula por cada fase:* Las corrientes de fase de la máquina pueden alcanzar valores extremadamente altos como para poder implementarse con un único dispositivo electrónico de potencia, además la utilización de varios de estos dispositivos en paralelo resultan muy complejas y poco económicas
- *Alta fiabilidad:* En el caso que la aplicación necesite una elevada fiabilidad, para trabajar inclusive en el caso de pérdida de una o más ramas del inversor
- *Disminución de los armónicos:* Las máquinas multifásicas poseen menor contenido de armónicos, además el contenido de armónicos de la corriente del DC-link (Vdc) que alimenta los inversores debe ser reducido para tener una capacidad del filtro de entrada más pequeña, especialmente cuando el inversor opera con formas de onda cuadrada
- *La reducción del 6° armónico asociado al par pulsante:* El 6° armónico puede ser eliminado mediante la solución multifásica por medio de una cancelación, producto de una distribución apropiada de las bobinas de la máquina
- *Reducción del tamaño de componentes:* se puede conseguir inversores de fuente de corriente (CSI, por sus siglas en inglés) económicos, reduciendo el tamaño de los componentes reactivos y los picos de las tensiones de conmutación
- *Reducción de pérdidas en el rotor:* En comparación con la solución trifásica, las pérdidas por armónicos en el rotor de la máquina son más reducidas para el caso multifásico
- *Control multi-máquina:* En las soluciones multifásicas se pueden aprovechar los grados de libertad para realizar un control simultáneo de múltiples máquinas, utilizando un solo convertidor de potencia
- *Reducción de los pulsos del par electromagnético:* especialmente en máquinas alimentadas por convertidores de potencia de tipo CSI o convertidores de potencia de fuente de tensión (VSI, por sus siglas en inglés) operando en modo de generación de ondas de tensión cuadrada
- *Modificación de la velocidad de giro:* Cuando se debe mantener constante la frecuencia de alimentación, la solución multifásica permite variar la velocidad modificando el número de pares de polos de la máquina
- *Reducción de las pérdidas en el estátor:* existe una significativa reducción de las pérdidas por efecto *Joule* en el cobre del estátor según aumenta el número de fases de la máquina, en comparación con la solución trifásica

Las máquinas eléctricas de seis fases pueden ser clasificados en simétricas y asimétricas. Las simétricas, son aquellos cuyo desplazamiento espacial entre las bobinas del estátor es uniforme. En cambio, en las máquinas asimétricas, el desplazamiento espacial de las bobinas de dos fases consecutivas es diferente. Esto a su vez provoca una distribución asimétrica de los ejes magnéticos y es el caso particular que se utiliza en este trabajo. En este contexto, las máquinas multifásicas que ofrecen buenas prestaciones son los accionamientos electromecánicos que se han denominado máquinas hexafásicas de doble devanado trifásico independiente y asimétrico, esquematizado en la Figura 1 (a). Este tipo de máquinas eléctricas posee dos devanados trifásicos independientes, desfasados entre sí 30 grados eléctricos, con neutros aislados y accionados desde dos convertidores trifásicos diferentes. Las ventajas que aportan este tipo de accionamientos incluyen las asociadas a las máquinas multifásicas antes mencionadas, pero añaden otra muy importante que es la posibilidad de utilizar muchos de los desarrollos *hardware* y *software* existentes para los accionamientos trifásicos convencionales (sistemas microprocesadores

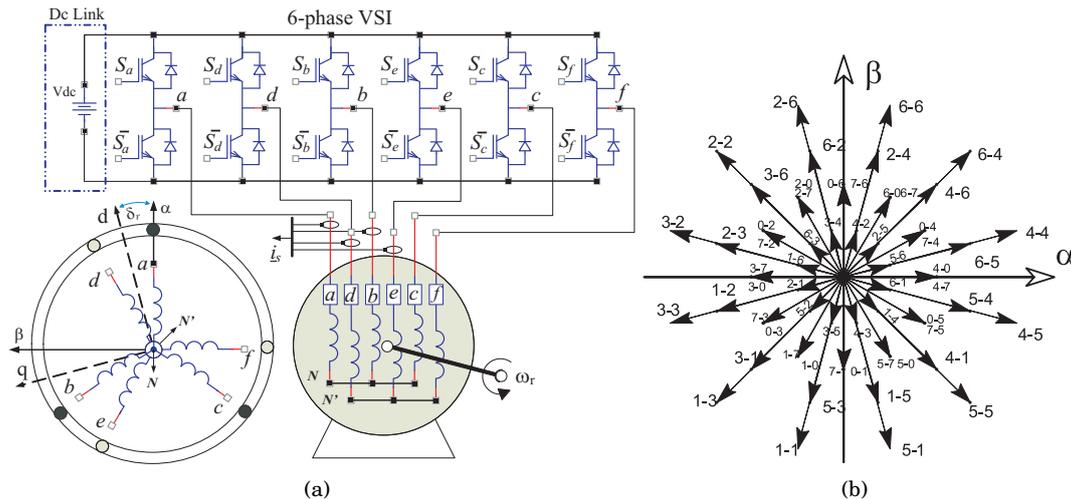


Figura 1: (a) Esquema general del accionamiento de seis fases asimétrico. (b) Proyección de los 64 vectores de tensión en el sub-espacio $(\alpha - \beta)$.

con periféricos especiales para el control de convertidores de potencia trifásicos, convertidores de potencia convencionales, semiconductores y dispositivos electrónicos especiales para el control y disparo de interruptores de potencia incluidos en convertidores comerciales, y otros).

Una metodología que simplifica el modelo del accionamiento de seis fases se basa en la Teoría de Descomposición de Vectores (VSD, por sus siglas en inglés). Esta teoría fue introducida por [Zhao, 1995] y es utilizada para transformar el sistema original representado mediante seis ecuaciones diferenciales, en tres sub-espacios ortogonales bidimensionales $(\alpha - \beta)$, $(x - y)$ y $(z_1 - z_2)$ que poseen ejes de referencia estáticos, utilizando una matriz de transformación de variables de fase a sub-espacios ortogonales. A partir de la teoría VSD es posible enfatizar que la conversión de la energía electromecánica se encuentra relacionada con las variables (tensiones y corrientes) proyectadas en el sub-espacio $(\alpha - \beta)$, mientras que las variables proyectadas en el sub-espacio $(x - y)$ representan armónicos de orden $6n \pm 1$ ($n = 1, 3, 5, \dots$) y están relacionadas con las pérdidas por efecto *Joule* por lo que deben ser controladas de manera a que estas variables sean lo más pequeñas posible. Los vectores de tensión proyectados en el sub-espacio $(z_1 - z_2)$ son cero para el caso particular de la máquina de seis fases asimétrica con neutros independientes por lo que este sub-espacio no tiene influencia alguna en el control. La proyección de los $2^6 = 64$ distintos vectores de tensión para el caso particular de la máquina de seis fases en el sub-espacio $(\alpha - \beta)$ pueden apreciarse en la Figura 1 (b).

2.1. Análisis mediante simulaciones

Utilizando las ecuaciones que modelan el funcionamiento de la máquina de inducción de seis fases y la herramienta de simulación *Matlab/Simulink*, a continuación se resumen los resultados obtenidos a partir del modelo de simulación. Los parámetros utilizados en las simulaciones, fueron extraídos de una máquina real, utilizando métodos clásicos, de ensayo de vacío (tensión nominal), y rotor bloqueado (corriente nominal).

En las gráficas de la Figura 2 (a) se muestran los resultados simulados de la evolución del par de la máquina a lo largo del tiempo total de simulación (2 segundos), cuando la máquina es alimentada con tensiones sinusoidales con una frecuencia eléctrica de 50 Hz. En esta figura puede apreciarse la oscilación característica de la curva de par debido al desequilibrio de las corrientes del estátor (ver Figura 2 (a)). Este comportamiento transitorio, coincide con las afirmaciones realizadas en [Krause, 1995]. Posteriormente, la curva de par evoluciona hasta un valor distinto de cero que depende del coeficiente de fricción (B_i) de la máquina. Por otro lado, la velocidad del accionamiento tiende a alcanzar la velocidad síncrona¹, sin embargo, tal como puede apreciarse en la Figura 2 (b), la velocidad en régimen permanente no alcanza la velocidad síncrona debido a las características propias de la máquina de inducción asíncrona, por el efecto del deslizamiento.

¹La velocidad síncrona es de 1000 rpm para el caso particular de la máquina con 3 pares de polos.

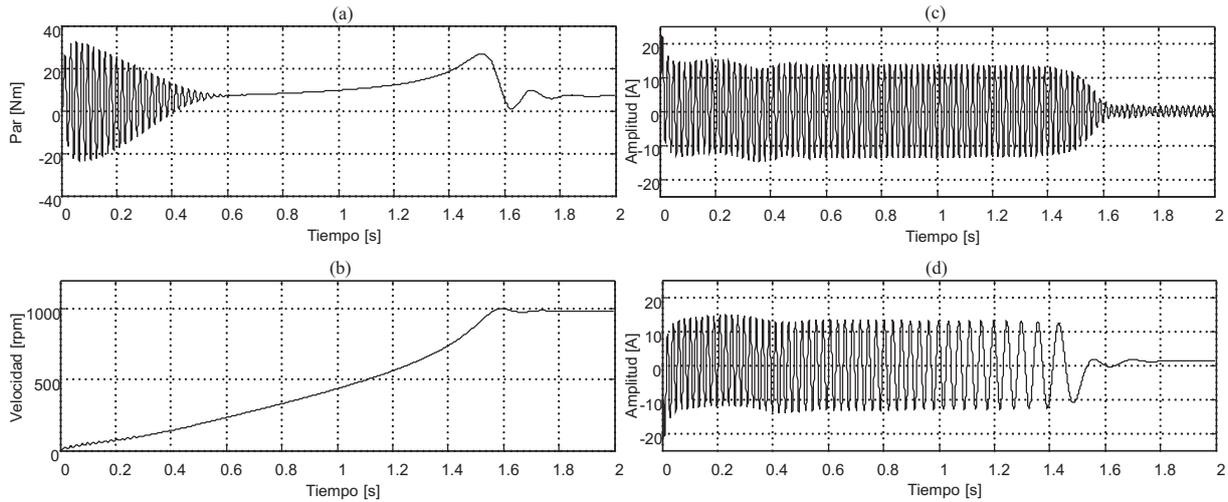


Figura 2: (a) Evolución del par. (b) Evolución de la velocidad. (c) Corriente del estátor, correspondiente a una de las fases de la máquina. (d) Corriente del rotor.

En las gráficas de la Figura 2 (c) se muestra la evolución de la corriente de una de las fases del estátor de la máquina en una ventana de tiempo de simulación equivalente a 2 segundos. En esta figura es posible notar el consumo de corriente de la máquina en el momento del arranque. En el instante de tiempo igual a 1.5 segundos la máquina llega a su velocidad nominal (cercana a 1000 rpm según la Figura 2 (b)) y el consumo de corriente en vacío del accionamiento multifásico es cercano a los 3 amperios. Finalmente, en la gráfica de la Figura 2 (d) se muestra la evolución de la corriente del rotor, en esta figura es posible apreciar que la frecuencia de la senoide de corriente disminuye conforme aumenta el tiempo hasta que la máquina alcanza su velocidad nominal debido principalmente a una disminución del deslizamiento. Puede observarse además, que una vez que la máquina alcanza la velocidad nominal fluye por el rotor una corriente muy pequeña que se debe en este caso al coeficiente de fricción de la máquina (se considera que la máquina no posee carga).

2.2. Diseño de la plataforma de ensayo experimental

En este apartado se resume el diseño y la puesta a punto de la plataforma de ensayo experimental, el cual actualmente (marzo 2013) se encuentra funcional y los trabajos se centran en la extracción de resultados experimentales que permitan validar los resultados que se han obtenido previamente a nivel de simulaciones. En este contexto, con la finalidad de emular el comportamiento de la turbina eólica, y asumiendo que el objetivo del bucle de control de velocidad es lograr el control de manera eficiente de la velocidad de giro del rotor del accionamiento a fin de alcanzar el MPPT que garantiza la máxima entrega de potencia a la carga, se utilizó el modelo matemático de la turbina para realizar simulaciones. En la Figura 3 puede observarse una simulación paramétrica de la variación de la potencia generada en función a la velocidad angular de la turbina para distintas velocidades de viento, extraída utilizando el modelo de simulación *Matlab/Simulink*.

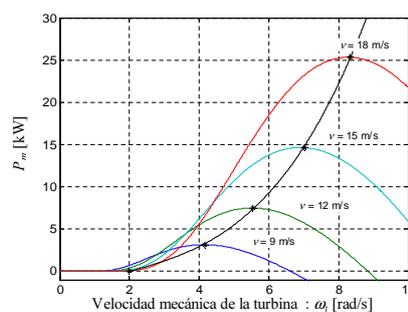


Figura 3: Modelo de la turbina eólica. Potencia vs. velocidad del rotor.

El diagrama de bloques de los distintos componentes que conforman la plataforma experimental puede apreciarse en la Figura 4. Puede observarse en el diagrama de la figura que la turbina es emulada mediante un *software* propietario que se ejecuta en la *PC Controladora del Sistema* y que asume como variables de entradas ciertos parámetros que son extraídos en tiempo real, desde una estación meteorológica de la serie *Vantage Vue* de *Davis Instruments*. Este dispositivo posee una consola que recibe los datos de la estación de manera inalámbrica y se conecta vía USB a la *PC Colectora de datos* desde donde se extraen los datos que son utilizados para emular la turbina eólica. Esta PC opera con sistema operativo *Debian 6.1* que es una distribución de *GNU/Linux* de licencia libre. Los datos son utilizados para realizar cálculos en tiempo real de la velocidad óptima de giro del rotor del GIM para extraer la máxima potencia. El *software* que se ejecuta en la *PC Controladora del Sistema*, recibe como entrada los siguientes parámetros; características de la turbina (ángulo de inclinación β y el radio de las aspas R_t) y la velocidad del viento (ν), con lo cual calcula el coeficiente de potencia máximo (C_p^{max}) y el valor óptimo de la velocidad lineal de giro de la turbina λ^{opt} . De esta forma, el *software* genera como salida la velocidad angular de referencia óptima (ω_t^*) de manera a lograr el punto de máxima potencia.

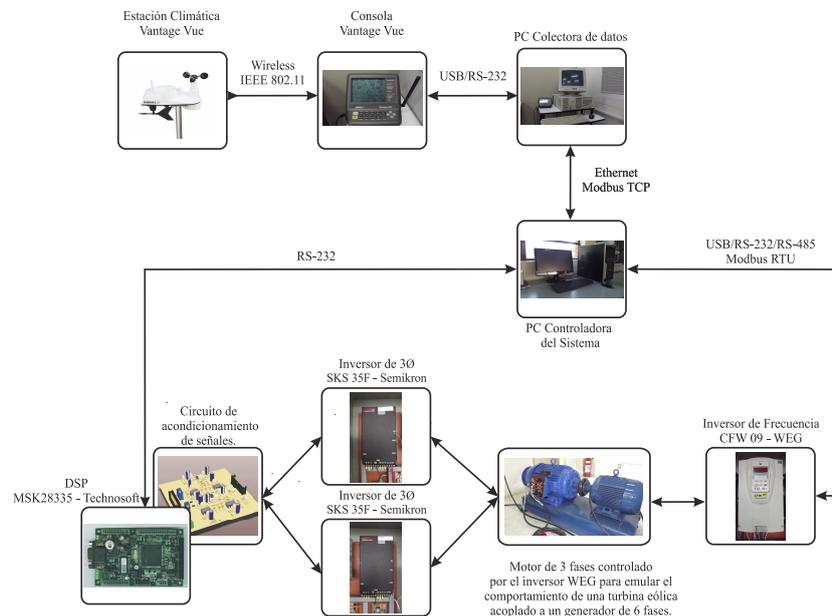


Figura 4: Fotografía de los distintos componentes que conforman la plataforma experimental donde se detalla el protocolo de comunicación entre cada dispositivo.

Por otro lado, la *PC Controladora del Sistema* debe comunicarse con la *PC Colectora de datos* de manera a extraer la información de la estación en tiempo real. A este efecto se ha desarrollado un *software* que extrae datos cada cierto tiempo (configurable) de la consola del *Vantage Vue*, y lo almacena en un archivo con un formato especial que es propio de la aplicación. El mismo programa, en un hilo separado actúa como un servidor Modbus TCP, de modo que espera las solicitudes entrantes a través de la red TCP/IP. Las solicitudes provienen desde un cliente y solicitan siempre lo mismo; que se envíe los últimos datos climáticos leídos, este programa por tanto, es llamado *Servidor Vantage*. Para este sistema, el cliente Modbus que se conecta al *Servidor Vantage* es el *software* de emulación de la turbina. Por otro lado el *software* de emulación se conecta vía Modbus RTU a un *Inversor de Frecuencia* (serie CFW09 de la marca WEG) acoplado al GIM. El *Inversor de Frecuencia* recibe como parámetro la velocidad óptima de giro del GIM que representa una entrada al bloque del control de velocidad. La comunicación establecida entre la *PC Controladora del Sistema* y el *Inversor de Frecuencia* se rige por el protocolo Modbus RTU y se realiza sobre una red serial bajo el protocolo de capa física RS-485, en esta red el *software* de emulación se comporta como un máster Modbus RTU y el *Inversor de Frecuencia* actúa como un esclavo. Para lograr esta aplicación se ha diseñado una tarjeta convertidora de protocolo RS232 a RS485 que establece el medio de comunicación entre ambos módulos. Esta tarjeta se muestra en la fotografía de la Figura 5 (d).

En la fotografía de la Figura 5 (a) puede apreciarse el montaje concluido de la aparamenta de potencia diseñada, donde se muestran los convertidores de potencia, los dispositivos de protección y las placas de



Figura 5: Fotografía de los distintos componentes que conforman la plataforma experimental.

acondicionamiento de señal que como puede apreciarse en la fotografía integra la placa de control². A fin de mantener la integridad del sistema, las señales conectadas a los periféricos de entrada y salida de la placa de control han sido aisladas galvánicamente mediante el aislador ISO7230CDW fabricado por la empresa *Texas Instruments*. En la fotografía de la Figura 5 (b) se muestra la integración de los distintos módulos que conforman la plataforma experimental diseñada.

Por otro lado, la conexión de un banco de capacitores en los terminales del GIM es necesaria de manera a suministrar la potencia reactiva a la carga. Para el caso particular del generador de inducción de doble devanado trifásico independiente y asimétrico abordando en este trabajo, se ha montado un banco de capacitores mediante dos configuraciones independientes en estrella, conectados en paralelo con los bobinados del estátor del accionamiento. Una fotografía de la aparamenta de potencia diseñada para el caso de los capacitores de magnetización se muestra en la Figura 5 (c). El GIM, ha sido diseñado a partir de un motor originalmente trifásico de 15 kW de potencia nominal con 72 ranuras y tres pares de polos. Una fotografía del accionamiento rebobinado, montado sobre la bancada de ensayo y acoplado al motor trifásico que emula la turbina eólica puede apreciarse en la Figura 5 (e).

Los módulos Inversores de la serie SKS 35F fabricados por la empresa *Semikron* utilizados para el desarrollo del trabajo (ver Figura 4), poseen internamente una resistencia de pre-carga de manera a limitar la corriente sobre los capacitores que según especificaciones del fabricante, deberán permanecer activas mientras el banco de capacitores (que conforma el Dc-link) alcanza su carga nominal. En este contexto, y con la finalidad de automatizar el control de las resistencias de pre-carga, se ha diseñado una tarjeta de control, previendo dos modos de operación; por *hardware* o por *software*, respectivamente. Una fotografía de la tarjeta de control diseñada se muestra en la Figura 5 (f).

A fin de evaluar el correcto funcionamiento de la plataforma experimental, se ha realizado pruebas en lazo abierto generando los disparos de los IGBTs utilizando la técnica de modulación por ancho de pulso considerando una frecuencia de muestreo (equivalente a la frecuencia de la portadora) de 5 kHz y una frecuencia eléctrica de 50 Hz. En la Figura 6 (Izq.) se muestra la respuesta transitoria del accionamiento, si se considera una de las corrientes de fase para el caso del accionamiento de seis fases. Tal como puede apreciarse en esta figura al momento del arranque, el accionamiento alcanza picos de corriente superiores a los 25 A, con un transitorio que se extingue en 0.45 segundos. Por otro lado, en la Figura 6 (Der.) se muestra el consumo de corriente en vacío que para una frecuencia nominal de 50 Hz puede ser cuantificada en 5 A. Estos resultados, demuestran el funcionamiento óptimo de la plataforma diseñada y conforman el punto de partida para la extracción de resultados experimentales que avalen la eficiencia de los métodos de control que han sido propuestos en el marco del trabajo.

²La placa de control se basa en el DSP TMS320F28335 de punto flotante fabricado por la empresa *Texas Instruments* y en el sistema de desarrollo MSK28335 de la empresa *Technosoft*, tal como se muestra en la Figura 4.

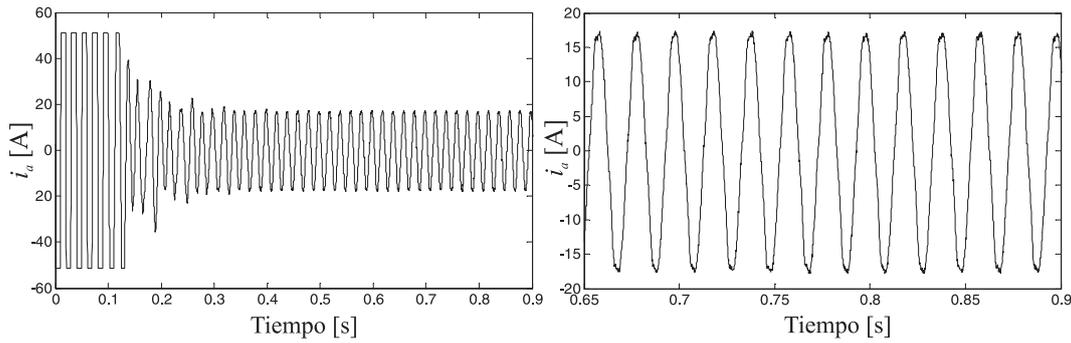


Figura 6: Ensayo experimental en lazo abierto aplicado al GIM. (Izq.) Respuesta transitoria del accionamiento. (Der.) Consumo de corriente en vacío para una frecuencia nominal de 50 Hz.

2.3. Generación eólica

En la Figura 7 muestra el esquema del control propuesto. Los algoritmos asociados al control de velocidad del GIM, enfocado en la obtención del MPPT (denominado “Control del lado del generador”), y por otro lado el control de corriente orientado al control de la potencia activa y reactiva entregada a la carga (denominado “Control del lado de la red”), lo cuales serán desarrollados en la sección 4.

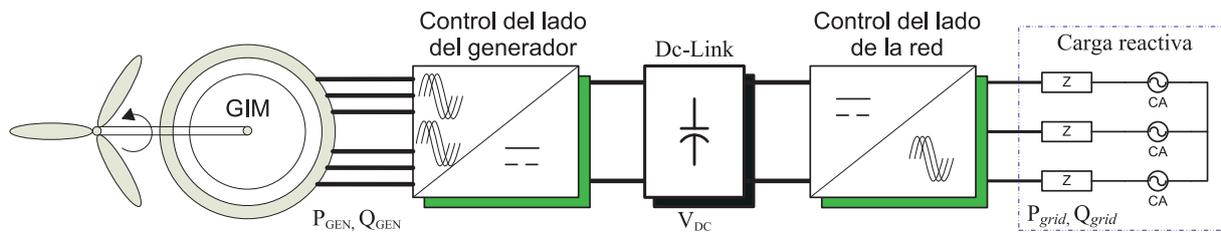


Figura 7: Diagrama de bloques del esquema propuesto.

Tal como puede observarse en la Figura 8, el controlador del tipo predictivo no requiere a priori de técnicas de modulación, característica que lo vuelve atractivo en el campo del control de accionamientos electromecánicos. En su forma más básica, el objetivo del bucle interno del control de corriente es encontrar el esfuerzo de control que logre el seguimiento de la corriente, donde i_s^* es la consigna de corriente o corriente de referencia, tal como se muestra en la Figura 8. Para ello, el control predictivo utiliza un optimizador que selecciona el esfuerzo de control U más adecuado que minimice una función de costo. Por lo general, existe más de un método para aplicar esto a accionamientos electromecánicos, dependiendo de la complejidad de la función de costo considerada [Barrero et al., 2011]. Una taxonomía de las posibles funciones de costo que pueden ser implementadas puede consultarse en [Rodríguez et al., 2012].

En el esquema propuesto las referencias son proporcionadas por el bloque que emula la turbina, y son recalculadas en cada periodo de muestreo de manera a lograr en cada muestra el MPPT. Para el control de velocidad se utiliza un controlador Proporcional Integral (PI) basado en el esquema del control vectorial indirecto. En el esquema propuesto, el controlador PI de velocidad es utilizado para generar la referencia de corriente i_{ds}^* en coordenadas dinámicas. La corriente de referencia utilizada en el modelo predictivo es obtenida mediante el cálculo del ángulo eléctrico, donde este parámetro es utilizado para convertir la referencia de corriente originalmente especificada en coordenadas dinámicas ($d - q$) a coordenadas estáticas ($\alpha - \beta$), tal como se muestra en la Figura 8.

2.3.1. Análisis de eficiencia mediante simulaciones

Un entorno de simulación basado en la herramienta *Matlab/Simulink* ha sido diseñado de manera a evaluar la eficiencia del esquema propuesto. La eficiencia es medida con respecto al error cuadrático medio (ECM) con respecto a la velocidad y las corrientes del estátor. En las Figuras 9 (Der.) e (Izq.) pueden apreciarse que el ECM asociado al control basado en el Filtro de *Kalman* posee mejores prestaciones que el caso del control basado en el estimador de *Luenberger*, obteniéndose una mayor diferencia a medida

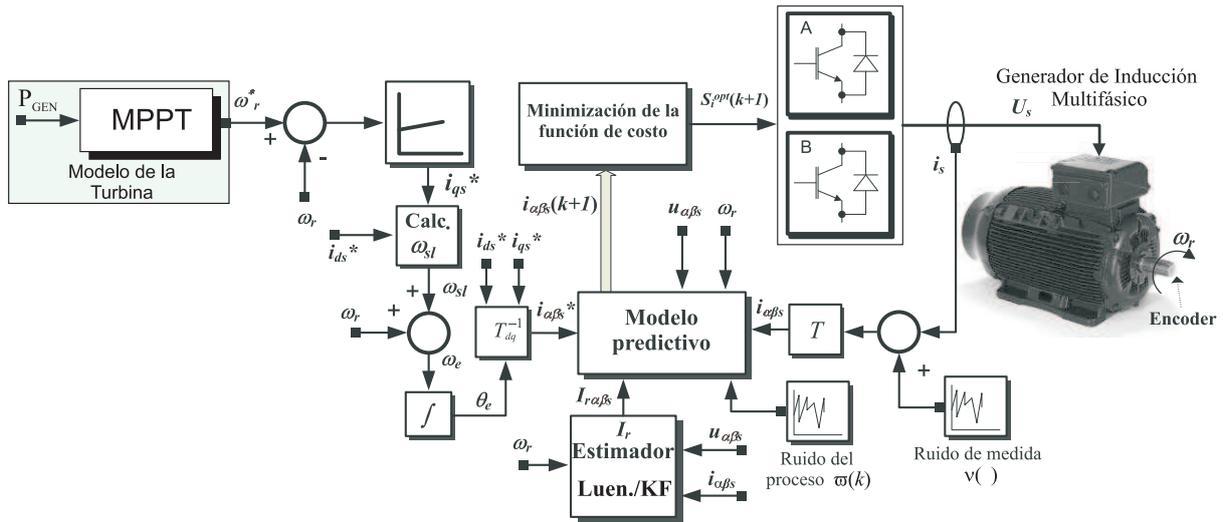


Figura 8: Diagrama de bloque del esquema propuesto de control de velocidad.

que los ruidos de medida (R_v) y de proceso (R_w) aumentan. Puede observarse además que los dos métodos de control propuestos presentan mejoras significativas si se lo compara con la técnica de control que no utiliza estimadores de estados en el modelo de predicción. El sub índice $(\alpha - \beta)$ representa cantidades de corriente en el sistema de referencia estacionario. La medida de velocidad es realimentada y el error es inyectado al controlador PI tal como se muestra en la Figura 8.

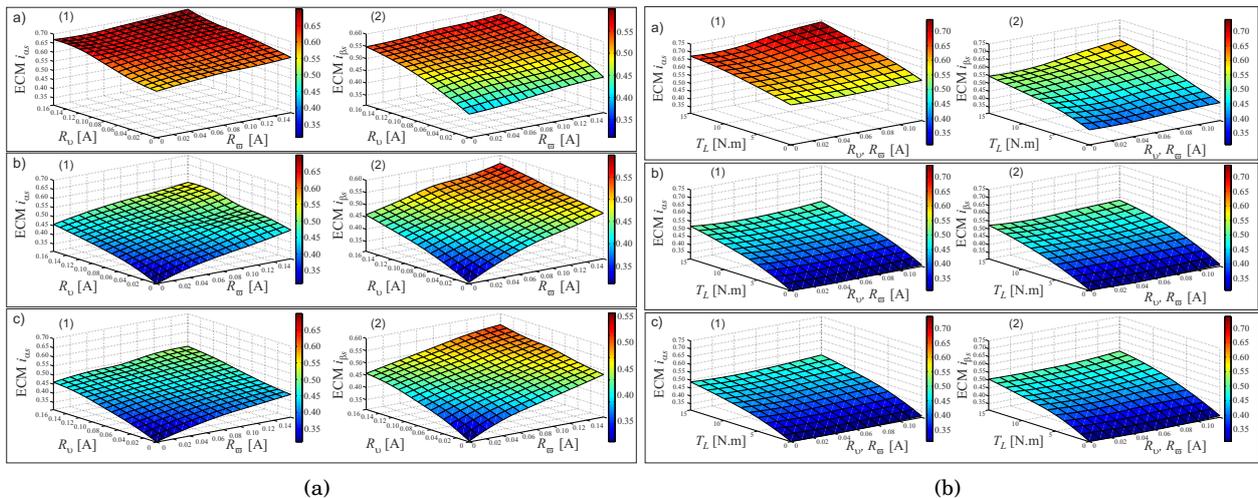


Figura 9: Resultados de simulación. (Izq.) ECM de la corriente del estátor en los ejes α y β , variando el ruido de medida (R_v) y el ruido de proceso (R_w), mediante los métodos: (a) Sin utilizar estimadores, (b) Observador de Luenberger y (c) Filtro de Kalman. (Der.) ECM de la corriente del estátor en los ejes α y β , variando el ruido de medida (R_v), el ruido de proceso (R_w) y el par de carga (T_L), mediante los métodos: (a) Sin utilizar estimadores, (b) Observador de Luenberger y (c) Filtro de Kalman.

3. Generación de energía solar fotovoltaica

Existen actualmente en la literatura, varios enfoques para incrementar la eficiencia de un sistema de generación fotovoltaico; uno de ellos se centra en los sistemas de rastreo solar que basan su funcionamiento en algoritmos de control dinámicos o activos. Diferentes estudios han demostrado que los paneles fotovoltaicos tienen una máxima potencia de salida cuando la incidencia (de los rayos del sol) es perpen-

dicular a los paneles [Larard, 1998], [Hamilton, 1998], la mejora puede ser cuantificada incluso en un 50% [Argeseanu et al., 2010]. Por otro lado, si se considera la ubicación geográfica del Paraguay, sobre todo en días de verano, cuando la irradiación solar alcanza los niveles más elevados, puede observarse que en este periodo existe una variación aproximada de 30° en azimut, lo cual justifica plenamente la necesidad de utilizar un sistema de dos grados de libertad para maximizar la potencia producida por los paneles solares fotovoltaicos. En este contexto, esta sección se presenta, por un lado, los resultados de simulación de las prestaciones de los paneles solares fotovoltaicos (PSFs) en sus distintas formas de conexión, y por otro lado, el diseño y la puesta a punto de una estructura soporte móvil de dos grados de libertad (para los paneles solares fotovoltaicos), para en un trabajo futuro abordar la implementación de algoritmos de control de posición en tiempo discreto enfocados en la mejora de la eficiencia energética del sistema de generación mediante el diseño de algoritmos cuyas consignas de control se enfocan en alcanzar el MPPT que garantizan el máximo aprovechamiento energético de los paneles fotovoltaicos.

En la Figura 10 (a) puede observarse una fotografía del módulo de la serie ZDNY-100C36 utilizado en el presente trabajo. Mientras que, en la Figura 10 (b) se muestra el circuito eléctrico que modela una celda del panel solar fotovoltaico donde además se representa las características eléctricas más resaltantes de este dispositivo a fin de elaborar las ecuaciones que describan el comportamiento dinámico del PSF. Las ecuaciones así obtenidas modelan matemáticamente el comportamiento de los módulos solares, despreciando los efectos térmicos.

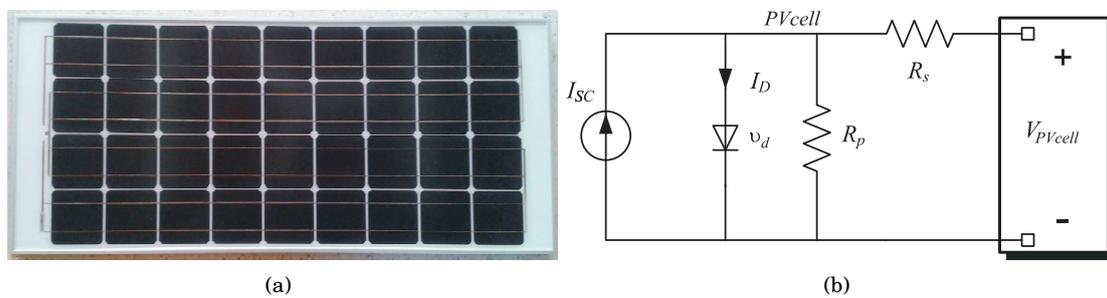


Figura 10: (a) Fotografía del módulo de la serie ZDNY-100C36. (b) Circuito eléctrico del PSF.

3.1. Simulación de las prestaciones dinámicas del PSF ZDNY-100C36

A fin de implementar el modelo de simulación de los PSFs de la serie ZDNY-100C36, se hace uso del modelo matemático que se obtiene del modo mencionado en el apartado anterior. Para ello se utiliza el entorno de simulación *Matlab/Simulink* y las características técnicas proporcionadas por la hoja técnica del fabricante de los paneles que se resumen en la Figura 11 (a), donde V_m y I_m representan la tensión y la corriente óptima de operación, respectivamente. En la Figura 11 (b) puede apreciarse una simulación paramétrica de la evolución de la intensidad de la corriente I_{PV} en función a la tensión V_{PVcell} para distintos valores de irradiación³. Por otro lado, en la Figura 11 (c) se muestra la variación de la potencia eléctrica generada por los paneles en función a la tensión para los mismos rangos de variación de irradiación considerados para el caso de la Figura 11 (b). Puede observarse en estas gráficas que para cada valor de irradiación existe un punto de máxima potencia que garantiza la máxima entrega de potencia activa desde el sistema de generación solar fotovoltaico hacia la carga.

3.1.1. Esquema de conexión en Paralelo

En esta configuración se considera un arreglo de 24 PSFs conectados en paralelo, por lo cual todos tienen la misma tensión de operación (V_{PVcell}). La corriente total de la configuración en Paralelo se obtiene mediante la suma de las corrientes de salida de cada uno de los módulos (I_{PV}). La potencia total generada ($P_{PVtotal}$) es igual al producto entre la tensión de operación y la corriente total del arreglo ($I_{PVtotal}$), el diagrama de bloques del esquema propuesto puede apreciarse en la Figura 12 (a). Debe tenerse en cuenta, que la principal limitación de esta topología radica en los niveles de corriente que debe soportar la electrónica de potencia asociada al proceso de conversión de la energía, que para esta

³Se ha considerado en las simulaciones rangos de irradiancia comprendidos entre 200 y 1000 en pasos de a 200 [W/m²].

aplicación en particular (considerando la máxima irradiación) puede alcanzar valores de $24 \times I_{PV}$, tal como puede observarse en la Figura 12 (b). Por otro lado, en la Figura 12 (c) puede apreciarse las curvas de Potencia en función de la Intensidad de corriente para distintos valores de irradiación para el caso particular de la conexión en Paralelo.

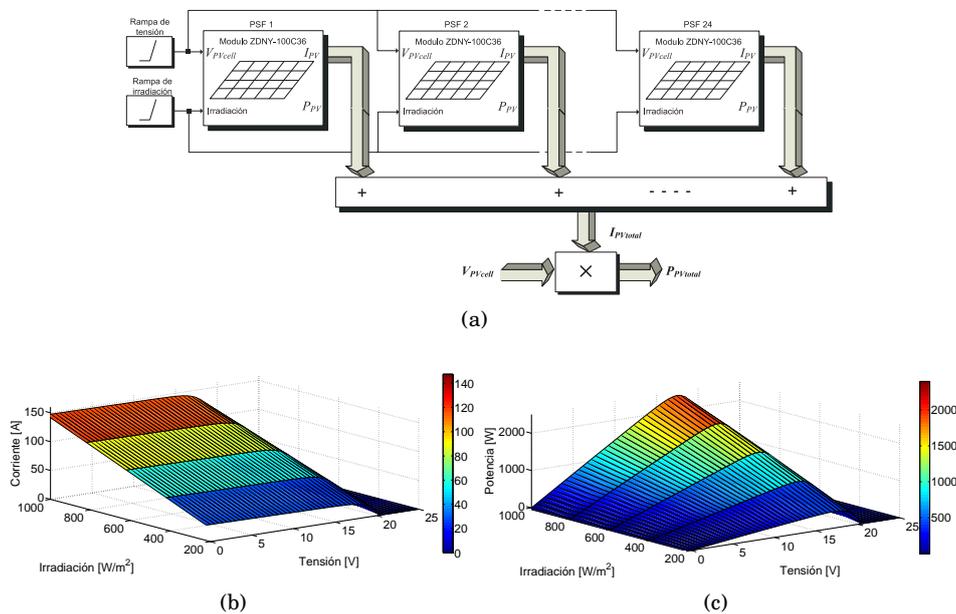


Figura 12: Simulación paramétrica para distintos valores de irradiación. (a) Esquema propuesto de conexión en Paralelo. (b) Curvas de Corriente vs. Tensión. (c) Curvas de Potencia vs. Tensión.

3.1.2. Esquema de conexión Serie - Paralelo

En esta configuración los módulos son agrupados en dos conjuntos de 12 PSFs como se ilustra en la Figura 13 (a). En cada conjunto los módulos están conectados mediante la configuración Serie, de tal forma que los PSFs operan con una misma referencia de corriente (I_{PV}). La tensión total de cada conjunto será entonces igual al producto entre el número de módulos solares fotovoltaicos en cada conjunto y la tensión de operación de los módulos ($12 \times V_{PVcell}$). Finalmente, ambos conjuntos están conectados entre si mediante una configuración Paralela, cuyo modo de operación es análogo al abordado en el apartado anterior. La ventaja del esquema de conexión Serie - Paralelo radica, por un lado, en que se opera con niveles de corrientes menores en comparación al caso del esquema de conexión en Paralelo, y por otro, en que la tensión total del arreglo es cercana a la amplitud (RMS) equivalente en alterna, tal como puede apreciarse en las gráficas de la Figura 13 (b). Puede apreciarse además en la Figura 13 (c) que la potencia nominal máxima (2.4 kW) ocurre para niveles máximos de irradiación y corriente, respectivamente.

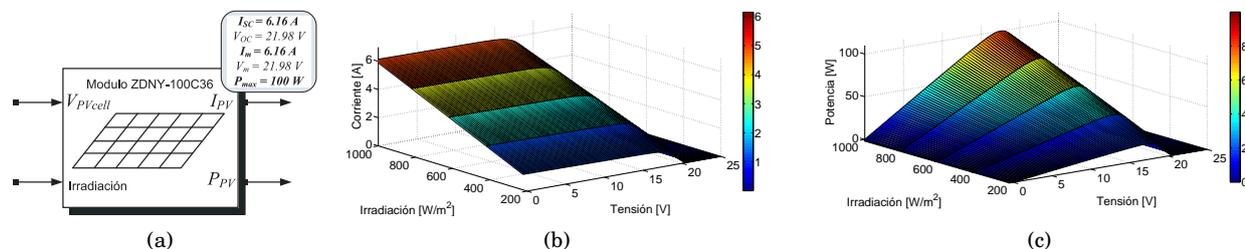


Figura 11: Respuesta dinámica del panel ZDNY-100C36 para distintos valores de irradiación. (a) Representación del modelo *Matlab/Simulink* con los respectivos parámetros. (b) Curvas de Intensidad de Corriente I_{PV} vs. la Tensión V_{PVcell} . (c) Curvas de Potencia vs. la Tensión V_{PVcell} .

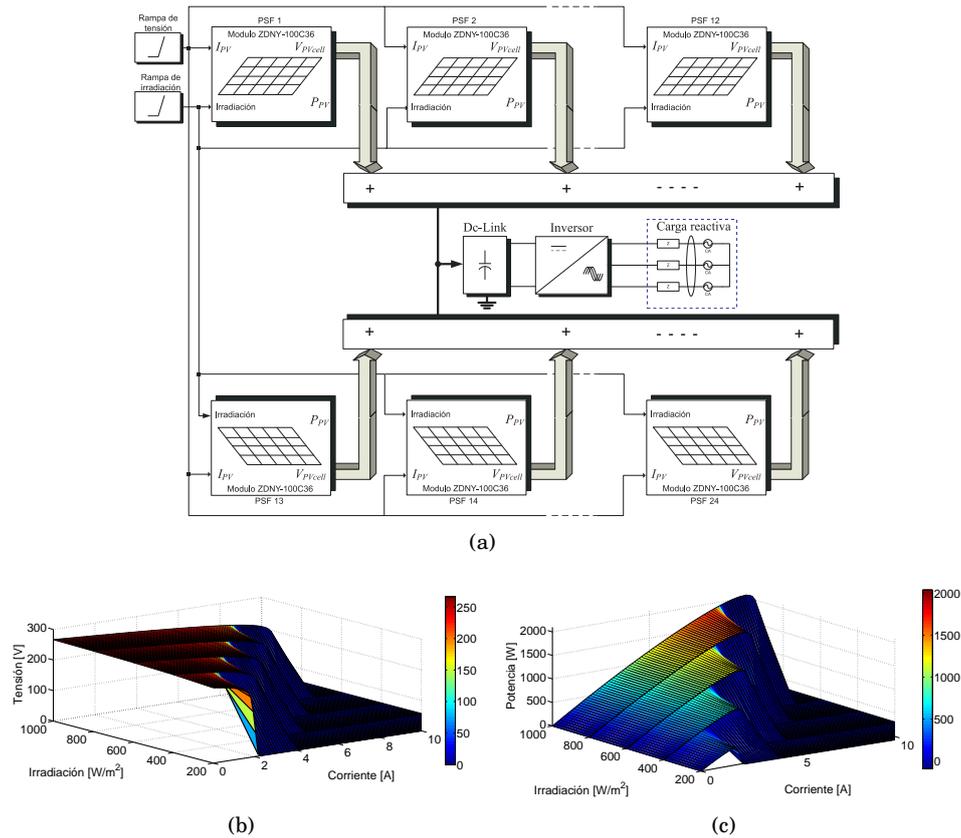


Figura 13: Simulación paramétrica para distintos valores de irradiación. (a) Esquema propuesto de conexión Serie - Paralelo. (b) Curvas de Tensión vs. Corriente. (c) Curvas de Potencia vs. Corriente.

3.2. Diseño e implementación de la estructura de dos grados de libertad

El proceso de diseño de la estructura de dos grados de libertad para la aplicación solar fotovoltaica se ha abordado siguiendo la siguiente secuencia; Primeramente, se ha realizado el diseño geométrico de la estructura, donde se ha tenido en cuenta las dimensiones físicas de los paneles fotovoltaicos. Por otro lado, a modo de dimensionar los materiales a ser utilizados para la elaboración de la estructura utilizando la herramienta de diseño computacional *Solidwork*, se ha realizado el cálculo de la fuerza equivalente del viento sobre cada panel solar, para posteriormente realizar el cálculo del estado de carga de la estructura. Finalmente, con los resultados teóricos, se ha dimensionado los elementos que conforman la estructura soporte que se propone para el desarrollo del trabajo.

En la Figura 14 (a) puede apreciarse el diseño geométrico de la estructura de dos grados de libertad. Se ha optado por esta topología debido a que este tipo de estructura ofrece resistencias menores a la fuerza del viento, lo cual permite, generalmente el dimensionamiento de piezas de menor peso, lo cual redundaría en beneficio de los motores a ser utilizados en esta aplicación, principalmente si se tiene en cuenta la potencia necesaria para mover la estructura. Por otro lado, los bornes de los paneles en esta topología son de fácil acceso, lo cual facilita la tarea de montaje. En la Figura 14 (b), puede observarse una vista lateral donde se especifica además los detalles para el ensamblaje de la estructura y en la Figura 14 (c) se muestran los detalles y dimensiones de parte de la estructura soporte de los paneles. Una vez definida la geometría de la estructura es verificada utilizando los procedimientos descritos en las normas mexicanas [CFE, 2008] ante la ausencia de normas locales y consideraciones relativas a la norma paraguaya de viento [INTN, 1992], obteniéndose resultados satisfactorios.

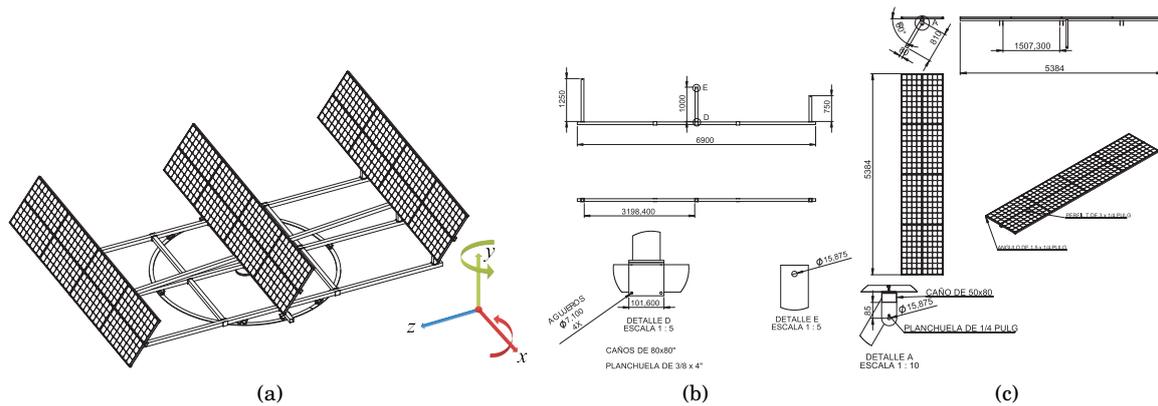


Figura 14: (a) Vista global del diseño de la estructura. (b) Vista lateral, dimensiones y detalles para el ensamblaje de la estructura. (c) Detalle y dimensiones de parte de la estructura soporte para los paneles.

3.2.1. Implementación y montaje

En este apartado se muestra la implementación de la estructura de dos grados de libertad para la aplicación solar fotovoltaica, la cual fue fabricada y montada. En la fotografía de la Figura 15 (a) se observa parte del proceso de montaje de la estructura. Por otro lado, en la fotografía de la Figura 15 (b) puede apreciarse una vista general de la estructura diseñada luego de concluir el montaje, la cual se encuentra físicamente instalada en el predio del Centro de Innovación Tecnológica (CITEC) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción.



Figura 15: Estructura de dos grados de libertad. (a) Proceso de montaje. (b) Vista general del montaje concluido.

La estructura fue fabricada a partir de piezas formadas por tubos y perfilaría de acero, y soldadura MIG. Las uniones de las piezas utilizan tornillos de acero inoxidable. Cada uno de los soportes posee 8 módulos de PSFs de 100 W de potencia nominal, dispuestos tal como se aprecia en la fotografía de la Figura 15 (b), proporcionando una potencia máxima de 2.4 kW.

3.3. Energía solar fotovoltaica

Desde el punto de vista la eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica a partir de paneles solares fotovoltaicos, se pretende abordar la problemática mediante, por un lado, la maximización de la

energía producida por los paneles mediante el diseño y la puesta a punto de un sistema de rastreo solar de dos grados de libertad enfocado en alcanzar el punto de máximo seguimiento de potencia. Por otro lado, tal como se demuestra en [Argeseanu et al., 2010], el aprovechamiento eficiente de la energía producida está a su vez relacionado con la conversión eficiente de la energía almacenada en el banco de baterías. En este contexto, se propone investigar estrategias de control de potencia activa y reactiva de manera a lograr la máxima transferencia de energía desde el banco de baterías hacia la carga. En la Figura 16 puede apreciarse el esquema de control propuesto que utiliza un lazo interno de control predictivo de corriente basado en la estrategia MBPC. En este esquema se considera además un eje de referencia dinámico ($d-q$) alineado con el vector de tensión V_{PFC} . Finalmente, la característica ortogonal de las variables eléctricas en ejes dinámicos, representado en el diagrama de bloque de la figura, permite el control independiente de la potencia activa y reactiva inyectada a la carga a través del control de las corrientes directas y en cuadratura respectivamente.

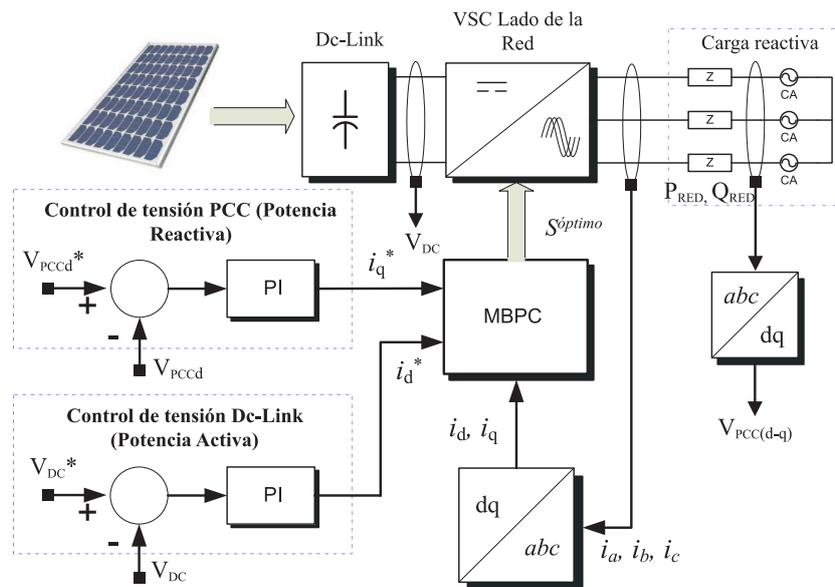


Figura 16: Esquema propuesto para la conversión electrónica de la energía y el control de la potencia.

El control de posición del sistema se realiza en una PC en tiempo real a través de un algoritmo proporcional-integral-derivativo (PID) independiente, tanto para acimut como para elevación. Los mismos reciben la referencia de parte de una PC que actúa como un registro de datos (datalogger en inglés) a través del protocolo Modbus TCP, y la señal de control se envía al microcontrolador como valor del ancho de pulso (0 a 100 %) a través del protocolo inalámbrico 802.15.4 usando transceptores Xbee Pro. La adquisición de datos de referencia se realiza a través de una solicitud Modbus hecha al PC datalogger, que se encarga de realizar una consulta a la estación climática por intermedio del microcontrolador, y son devueltas las posiciones de acimut y elevación calculadas por la estación basadas en los datos proveídos por el GPS. La adquisición de datos de realimentación se realiza a través del microcontrolador, que realiza la lectura de los encoders asociados a los motores de acimut y elevación, a través de una interfaz de entrada que provee dicha función específica. La señal es acondicionada a través de una placa electrónica que hace de interfase. El accionamiento se realiza a través de motores independientes para Acimut y Elevación, cuyo control se realiza por modulación de ancho de pulso, según el valor que ha sido calculado por el control PID que se describió anteriormente. Los motores son accionados a través de un controlador de motores que permiten disponer de la densidad de potencia necesaria. Tanto la realimentación como la señal de accionamiento son transmitidas por una conexión separada utilizando el protocolo inalámbrico 802.15.4, coordinado por una rutina de comunicaciones tanto en la PC de Control como en el microcontrolador, asegurando el determinismo del sistema.

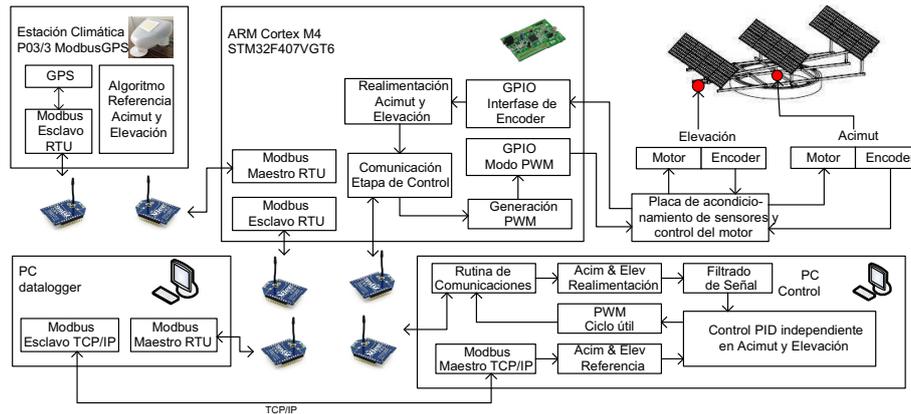


Figura 17: Diagrama en bloque del esquema propuesto.

4. Sistema de generación distribuida

Una vez extraída la máxima energía de los sistemas de generación presentados en los apartados anteriores, en este apartado se aborda el concepto de la generación distribuida. Para ello se toma como punto de partida el desarrollo de algoritmos de control de corriente como paso previo al proceso de sincronización y control de la potencia activa y reactiva, cuya consigna se centra en permitir la máxima transferencia de energía desde el generador hacia la carga. En este contexto se asume por un lado, que la salida del GIM es rectificadora mediante dos rectificadores trifásicos independientes y que la tensión rectificada es aplicada a un banco de capacitores que conforma el Dc-Link, y por otro lado que el sistema solar fotovoltaico se conecta a un banco de baterías con niveles de tensión compatibles a las tensiones de la red. En ambos casos ambos niveles de Dc-Link son conectados a la carga a través de un inversor trifásico como se muestra en la Figura 18 (a). La carga trifásica reactiva de la Figura 18 (b) puede ser modelada matemáticamente utilizando la representación en el espacio de estados.

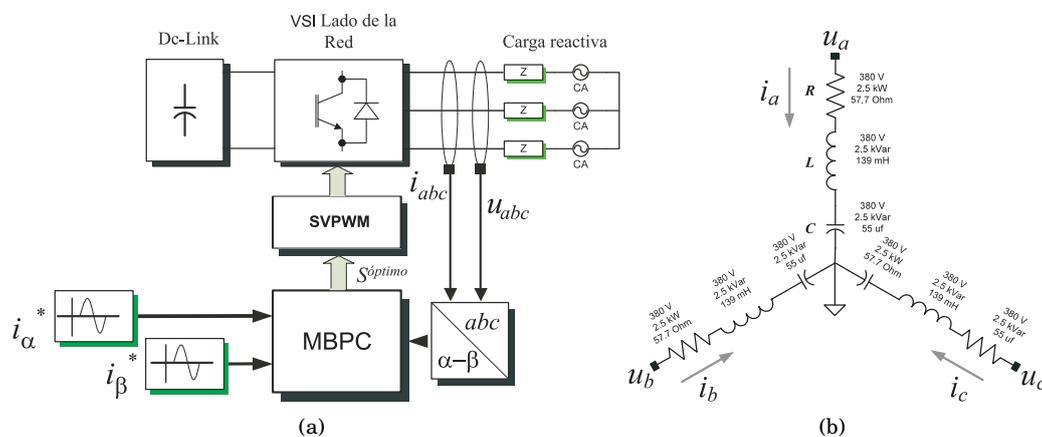


Figura 18: (a) Diagrama en bloque del control predictivo de corriente basado en la técnica SVPWM aplicado al lado de la red. (b) Carga trifásica reactiva RLC.

La Figura 19 muestra los resultados de simulación de las dos técnicas de control de corriente utilizados, la MBPC + SVPWM⁴ que es continua⁵ y el MBPC que es discontinua⁶. Se considera que es aplicada a la carga una corriente de referencia sinusoidal de 1.5 A de amplitud y 50 Hz de frecuencia eléctrica. Se asume que el sistema trifásico se encuentra operando en régimen permanente cuando es sometido a un cambio en las referencias de corriente en el sub-espacio $(\alpha - \beta)$ de 1.5 a 3.5 A de amplitud y fase.

⁴SVPWM, por sus siglas en inglés, *Space vector PWM*.

⁵Técnica continua: se produce conmutación en cada instante de muestreo.

⁶Técnica discontinua: se desconoce la frecuencia de conmutación.

La Figura 19 (a) muestra el seguimiento de corriente obtenido a partir del control discontinuo MBPC, mientras que en la Figura 19 (b) se muestra los resultados obtenidos a partir del control continuo MBPC combinado con una estrategia de modulación, cuyo diagrama en bloque se muestra en la Figura 18 (a). Como puede apreciarse en ambos casos la corriente medida converge al valor de referencia. Por otro lado, en las Figura 19 (c) y (d) se muestran el porcentaje de distorsión total armónica (THD, por sus siglas en inglés) medida con respecto a la frecuencia fundamental (50 Hz), cuantificada si se tiene en cuenta dos ciclos de la corriente *alfa* medida. En este contexto puede apreciarse como la técnica de control continua introduce mejoras si se tiene en cuenta la THD, lograda a costa del incremento en la frecuencia de conmutación de los interruptores de potencia.

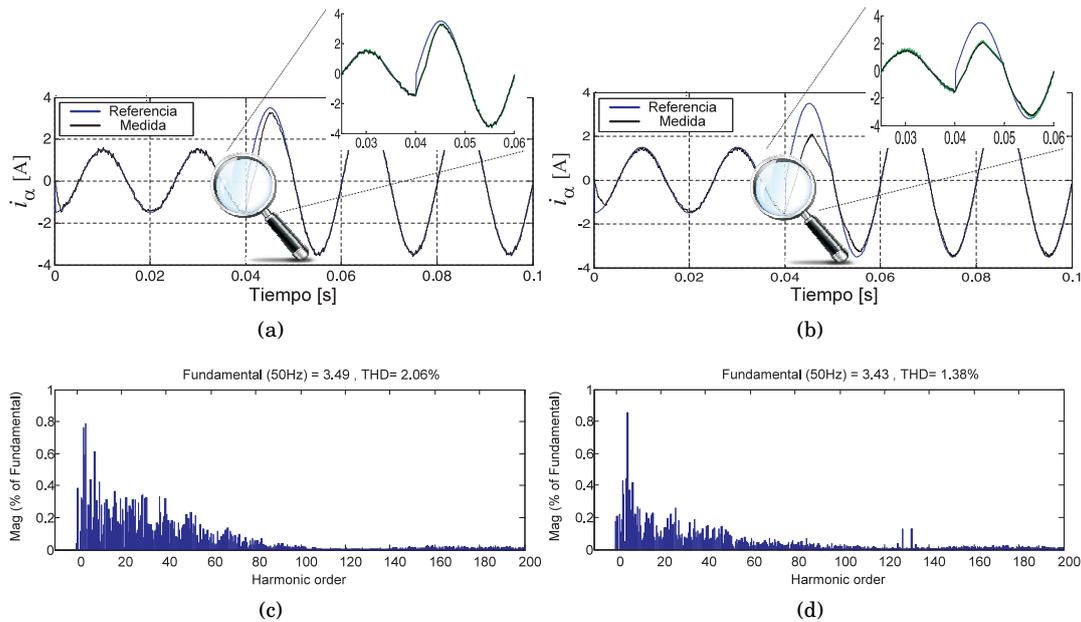


Figura 19: Resultados del control de corriente aplicado al lado de la red, la predicción de la corriente *alfa*, se muestra en la parte superior (en forma ampliada y de color verde). (a) Técnica de control discontinua MBPC. (b) Técnica de control continua MBPC + SVPWM. Distorsión armónica de la corriente *alfa*, para dos ciclos en régimen permanente sinusoidal. (d) Control MBPC.

5. Conclusión

En este trabajo se ha propuesto nuevos enfoques para sistemas de generación distribuida basadas en fuentes potenciales de energías renovables en Paraguay, en este contexto se ha abordado por un lado, el desarrollo, la implementación y la puesta a punto de un sistema de generación basado la energía eólica cuya principal aportación constituye el uso de generadores de inducción multifásicos como solución avanzada con respecto a los sistemas trifásicos reportados actualmente en la literatura, proponiendo además nuevas estructuras de control, evaluando las prestaciones del sistema eólico multifásico tanto a nivel teórico como a nivel experimental y por otro lado el diseño y la implementación de un novedoso sistema de generación basado en la energía solar fotovoltaica a través del diseño de una estructura soporte de dos grados de libertad, cuya ventaja principal radica en la simplicidad del diseño y la robustez comparada con la solución convencional de potencia nominal equivalente si se tiene en cuenta factores climáticos como la resistencia al viento. En ambos sistemas se han propuesto algoritmos de control cuyas consignas se han centrado en alcanzar el MPPT que garantiza la máxima entrega de energía a la carga. Finalmente siendo coherente con la filosofía asociada a la generación distribuida se ha presentado la integración de los sistemas propuestos a través de una estructura de control de corriente basada en dos técnicas de control (continua y discontinua) que se pretende sea el punto de partida para futuras implementaciones a nivel experimental, orientadas a la eficiencia energética con respecto a la reducción de armónicos, sincronización y conexión a red.

BIBLIOGRAFÍA

- [NU, 1998] Naciones Unidas (1998). Protocolo de Kyoto. *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*, URL, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- [Greenpeace, 2007] Greenpeace (2007). Greenpeace. *[r]evolución energética, perspectiva mundial de la energía renovable*, URL, http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/cambio_climatico/r-evoluci-n-energetica-persp.pdf
- [VMME, 2005] VMME (2005). Vice Ministerio de Minas y Energías. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, URL, http://www.crecerconenergia.net/archivos/PDF/pep_13VIIener_renovab.PDF
- [VMME PESE, 2005] VMME (2005). Vice Ministerio de Minas y Energías. *El Plan Estratégico del Sector Energético*, URL, http://www.crecerconenergia.net/archivos/PDF/pep_15IXplan_estrateg.PDF
- [Levi, 2008] Levi, E. (2008). Guest Editorial. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 5, (May 2008) page numbers (1891-1892), ISSN 0278-0046
- [Zhao, 1995] Zhao Y. & Lipo, T. (1995). Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 5, (October 1995) page numbers (1100-1109), ISSN 0093-9994
- [Ong, 1997] C.M. Ong, "Indirect Field Orientation Methods", Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MatLab/Simulink, Prentice Hall, 1997.
- [Larard, 1998] Larard, E. (1998). Tesis de grado. *Department of Electrical and Computer Engineering, University of Queensland*, (May 1998)
- [Hamilton, 1998] Hamilton, S. (1998). Tesis de grado. *Department of Electrical and Computer Engineering, University of Queensland*, (June 1998)
- [Argeseanu et al., 2010] Argeseanu, A., Ritchie, E. & Leban, K. (2010). New Low Cost Structure for Dual Axis Mount Solar Tracking System Using Adaptive Solar Sensor. *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, (May 2010) page numbers (1109 - 1114), ISSN 1842-0133
- [CFE, 2008] Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas (2008). *Manual de diseño de obras civiles: Diseño por viento*, URL, <http://www.mediafire.com/?mijonmx2zo0>
- [INTN, 1992] Instituto Nacional de Tecnología y Normalización - INTN - (1992). *Norma Paraguaya 30-001-92: Acción del viento en las construcciones*, disponible en la biblioteca del INTN.
- [Krause, 1995] Krause, P.C. (1995). Analysis of electric machinery. *McGraw-Hill Book Company, Technology and Industrial Arts*
- [Slootweg et al., 2003] Slootweg, J.G.; de Haan, S.W.H.; Polinder, H. & Kling, W.L. (2003). General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 1, (Feb 2003) page numbers (144-151), ISSN 0885-8950
- [Barrero et al., 2009] Barrero, F.; Arahall, M.; Gregor, R.; Toral, S. & Durán, M. (2009). A proof of concept study of predictive current control for VSI driven asymmetrical dual three-phase AC machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 6, (June 2009) page numbers (1937-1954), ISSN 0278-0046
- [Barrero et al., 2011] Barrero, F.; Prieto, J.; Levi, E.; Gregor, R.; Toral, S.; Durán, M. & Jones, M. (2011). An Enhanced Predictive Current Control Method for Asymmetrical Six-Phase Motor Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 8, (Aug. 2011) page numbers (3242-3252), ISSN 0278-0046
- [Rodríguez et al., 2012] J. Rodríguez y P. Cortés, "Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives", Wiley-IEEE Press, 2012, ISBN: 978-1-1199-6398-1.