

Desarrollo de la Máquina Eólica Mexicana en el IIE: proyecto MEM

Raúl González Galarza¹, José Manuel Franco Nava¹, Francisco Antonio Carvajal Martínez¹, Humberto Raúl Jiménez Grajales¹, José Luis Silva Farías¹, Raúl Garduño Ramírez¹ e Ignacio Torres Contreras²

Abstract

Currently, a variety of new concepts and different configurations of a rotor aerodynamics has been explored in order to improve, simplify or increase capacity utilization of wind energy. The technological development achieved in the last three decades has allowed to significantly increase this capacity, as well as the unit power on a large scale. This article presents an analysis of the 2011 world market supply of this technology and outlines the project development of the Mexican Wind Machine (MEM, Spanish acronym) by the Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Introducción

La configuración típica para el rotor aerodinámico de un aerogenerador es la de eje horizontal de baja solidez, la cual provee al rotor características idóneas para su aplicación en aerogeneradores. Ello a pesar de que a la fecha se han explorado un sinnúmero de nuevos conceptos y diferentes configuraciones del rotor aerodinámico para mejorar, simplificar o incrementar la capacidad de aprovechamiento de la energía del viento.

La problemática asociada a la confiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores en una central eolieléctrica depende en gran medida de la correcta selección de los aerogeneradores para el sitio de aplicación.



Con relación a su capacidad unitaria, el desarrollo tecnológico alcanzado en los últimos 30 años en cuanto a normatividad, materiales, nuevas técnicas y métodos de construcción, técnicas de control cada vez más sofisticadas y sobretodo al desarrollo alcanzado en electrónica de potencia han permitido incrementar significativamente esta capacidad y pasar de potencias unitarias del orden de 100 kW con diámetros de rotor de 20 metros a principios de los 80, a potencias del orden de 5 MW y diámetros de rotor hasta 120 metros.

A la par de lo anterior, la productividad de los rotores aerodinámicos se ha incrementado entre un 30% y 40% por el uso de perfiles aerodinámicos cada vez más eficientes y eficaces, en combinación con el uso de técnicas constructivas y de control de la potencia que permiten optimizar la eficiencia aerodinámica e incrementar su productividad, al operar éstos dentro de una más amplia gama de velocidades de viento.

¹ Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)

² Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)

Con relación a la configuración del aerogenerador para maximizar la transformación de la energía cinética del viento en energía eléctrica, existe un importante número de variantes relacionadas tanto con la velocidad angular del rotor aerodinámico (velocidad constante o variable), el tipo de generador eléctrico y el método de control de potencia utilizado, ya sea por desprendimiento de flujo (*stall*), o mediante el cambio del ángulo de paso del aspa (*pitch*). Otra vertiente en la configuración del aerogenerador radica en la utilización o no de una caja de engranes (multiplicadora) para acoplar la baja velocidad angular del rotor aerodinámico, con la velocidad de operación del generador eléctrico. Cuando se utilizan generadores eléctricos síncronos o asíncronos de alta velocidad (1800 rpm), se requiere necesariamente de una caja multiplicadora en el tren de potencia, para acoplar el rotor aerodinámico con el generador eléctrico. Para evitar el uso de una caja de engranes en el tren de potencia, se requiere utilizar generadores síncronos multipolo (de diseño especial) que operan a baja velocidad angular. Los generadores eléctricos que se utilizan en aerogeneradores pueden ser tanto del tipo síncrono (eléctricamente excitados o de imanes permanentes), como del tipo asíncrono o de inducción (tipo jaula de ardilla o de rotor devanado).

Con el propósito de establecer un marco de referencia representativo del estado del arte que guarda la tecnología de aerogeneradores, se presenta un análisis de la oferta 2011 del mercado mundial, considerando tanto su tecnología constructiva, como su configuración y clase de acuerdo con la norma IEC-61400. De los 143 modelos ofertados, el 61% utiliza **generador eléctrico asíncrono**, en combinación con una caja de engranes. De estos 88 modelos, el 80% tiene un generador de inducción doblemente alimentado (*Doubly-Fed Induction Generators-DFIG*) con convertidor electrónico de potencia a escala parcial. El 20 % restante está habilitado con un generador de inducción tipo jaula de ardilla, de los cuales el 45% se ofrece para conexión directa a la red y el 55% a través de un convertidor electrónico de potencia a escala completa.

En cuanto a los 55 modelos que se ofertaron con **generador síncrono** y que representan el 39% del total, 75% son del tipo imanes permanentes y 25% son del tipo eléctricamente excitados, todos ellos habilitados con convertidor electrónico de potencia

a escala completa para su conexión a la red. De este grupo, el 65% cuenta con caja de engranes y solamente el 35% no, por estar habilitado con un generador eléctrico multipolo de baja velocidad.

En relación con el régimen de viento para el cual los aerogeneradores fueron diseñados, la mitad (50%) de estos modelos son adecuados para operar en regímenes de viento moderado (<8.5 m/s de promedio anual), en tanto que el 25% está diseñado para operar en regímenes de viento alto (<10 m/s), y otro 25% para operar con vientos de baja intensidad (<7.5 m/s).

Respecto a la interconexión de las centrales eolieléctricas al sistema eléctrico (el conjunto de aerogeneradores de un parque), el cumplimiento de las regulaciones en materia de protección eléctrica, transmisión de datos, así como control y calidad de la energía en el punto de interconexión, impuestas por el organismo gestor de la operación del sistema son regulaciones cada vez más estrictas y determinantes para el otorgamiento del permiso de interconexión (código de red de la Comisión Federal de Electricidad-CFE).

La problemática asociada a la confiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores en una central eolieléctrica depende en gran medida de la correcta selección de los aerogeneradores (clase I, II, o III) para el sitio de aplicación. Una selección inadecuada impacta directamente en el costo de operación y mantenimiento (O&M), reduce la vida útil del sistema e incrementa el costo de la unidad de energía producida (\$/kWh), sobre todo si las rutinas de inspección y mantenimiento originales se mantienen sin cambio.

El objetivo en este proyecto es realizar el desarrollo tecnológico (diseño, construcción y pruebas) de un prototipo de aerogenerador de 1.2 MWe, Clase IEC-1ª, orientado a una producción comercial y a maximizar la utilización de las capacidades tecnológicas e infraestructura de la industria nacional, así como consolidar las capacidades nacionales para el desarrollo tecnológico de aerogeneradores y para el análisis de la problemática asociada con su operación y mantenimiento.

Mediante este proyecto se busca generar el principal elemento en la cadena de valor del desarrollo eólico nacional: las unidades generadoras. El proyecto abarca el diseño, fabricación, instalación e instrumentación del prototipo en el Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTe) para la ejecución de pruebas en viento libre. La capacidad tecnológica e infraestructura de la planta industrial en México constituyó un factor determinante en la conceptualización de este aerogenerador y la configuración modular adoptada en el diseño permitió obtener la versatilidad demandada por el prototipo para esta primera etapa. Este concepto modular ha demostrado en el tiempo su eficacia tanto en el tema de costo, como en el de confiabilidad y disponibilidad del equipo, y lo más destacable es que es la opción más ventajosa cuando se busca integrar el aerogenerador a la planta industrial existente de un país.

El equipo de trabajo integrado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para desarrollar este proyecto en su primera etapa, contó con la participación de especialistas de las áreas de energías no convencionales, turbomaquinaria, transmisiones mecánicas, engranes, instrumentación y control, electrónica, equipos eléctricos, y transmisión y distribución de energía eléctrica,

entre otras disciplinas. Este proyecto recibió en 2009, el apoyo económico del Fondo SENER-CONACYT para la Sustentabilidad Energética (FSE). Para su aplicación a dicho fondo, el proyecto se dividió en tres etapas con duración de 18 meses cada una, a saber: 1. Diseño y especificación de componentes, 2. Adquisición, fabricación de componentes y ensamble de subsistemas, y 3. Ensamble, instalación y pruebas en viento libre del prototipo. El liderazgo del proyecto lo tiene asignado el IIE, trabajando en asociación con el Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A. C.) y la empresa mexicana Ruhrpumpen, en el marco de un convenio de colaboración.

El concepto de diseño utilizado en la Máquina Eólica Mexicana (MEM) es el concepto danés: un rotor aerodinámico de eje horizontal de tres aspas, de baja solidez, de velocidad variable, con control de potencia por cambio de ángulo de paso (*pitch*), independiente en cada aspa y con respaldo de baterías, provisto de una unidad de control y supervisión basada en microprocesadores. Un sistema de orientación activo basado en motorreductores, disco de fricción y mordazas hidráulicas activas y pasivas, un sistema de paro basado en un freno principal de tipo aerodinámico (posición bandera de las aspas) y un secundario mediante disco de freno y mordazas hidráulicas a la salida de la caja de engranes, provisto además de un sistema manual para inmovilizar el rotor durante el mantenimiento de éste, todo ello montado sobre un chasis unitario



Figura 1. El concepto de diseño de la MEM es el concepto danés.

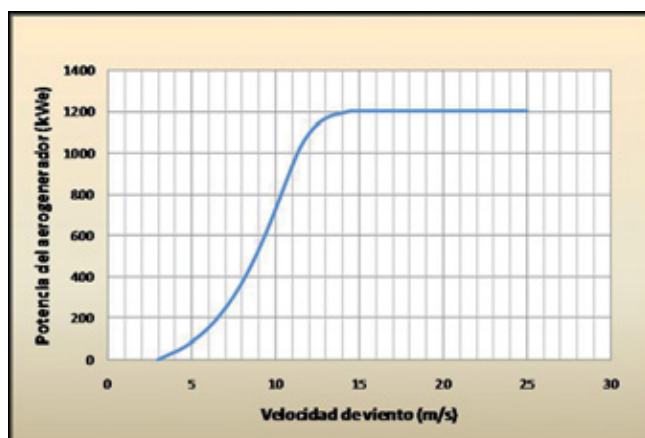


Figura 2. Curva de potencia a nivel del mar.

y una torre tubular de acero (figura 1). El generador se conecta a la red eléctrica en media tensión a través de un convertidor electrónico de potencia de escala completa (CA-CD-CA) y un transformador elevador, con lo que se obtiene una conexión suave y controlada. La combinación generador-convertidor provee capacidad para aportar energía a la red con un factor de potencia adelantado o atrasado dentro de un amplio rango, así como para soportar huecos de tensión a valor cero por transitorios en la red (ZVTR), y cumplir con los requisitos de códigos de red directamente relacionados con la calidad de la energía (IEC-61400-21).

Características principales del aerogenerador

Potencia nominal: 1,2 MW; diámetro del rotor: 60 m; altura de instalación: 60 m.; clase IEC: IA; velocidad de inicio: 4 m/s; velocidad de salida: 25 m/s. La figura 2 muestra la curva de potencia a nivel del mar.

Para su ejecución, el proyecto se subdividió con base en áreas de especialidad. El IIE fue la institución responsable de desarrollar los criterios, estudios y análisis conducentes para soportar los diseños, así como la especificación de cada uno de los diferentes subsistemas y elementos que integran el aerogenerador (filosofía de control, modos de operación y casos de carga de diseño, entre otros), todo ello con base en la normatividad vigente al igual que las metodologías y herramientas internacionales aplicables. Asimismo fue el responsable del establecimiento de los requerimientos de operación, mantenimiento y seguridad del aerogenerador, y del análisis de procedimientos y metodologías para la evaluación del diseño de aerogeneradores. El Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A. C.) fue el responsable del diseño de la caja de engranes del aerogenerador, incluyendo sus periféricos. La empresa tractora Ruhrpumpen, integrante de este consorcio, será la responsable de la ingeniería de manufactura, de la fabricación y ensamble en planta del aerogenerador, todas éstas actividades previstas para la segunda etapa del proyecto.

A la fecha se tiene concluida la etapa de diseño y especificación de componentes del aerogenerador, las siguientes actividades a desarrollar corresponden a la etapa de adquisición, construcción y ensamble

de subsistemas en planta y las correspondientes al ensamble, instalación, instrumentación y pruebas en viento libre del aerogenerador prototipo en las instalaciones del Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE), en la etapa final del proyecto.

Rotor, góndola, torre y sistemas auxiliares

El tren de potencia de un aerogenerador se conforma por una serie de componentes mecánicos y eléctricos que transforman la potencia mecánica en el cubo del rotor a potencia eléctrica. En los aerogeneradores de eje horizontal, estos componentes se encuentran en la parte superior de la torre (figuras 3 y 4). La conexión entre el rotor aerodinámico y la flecha de baja velocidad es uno de los ensambles más críticos en un aerogenerador de eje horizontal, debido a su función compuesta, es decir, satisfacer tanto una función estructural como mecánica. Las cargas de empuje, laterales y de torque, así como el peso del rotor generan cargas de fatiga sobre este ensamble. Además de los componentes mecánicos como la flecha de baja velocidad, rodamientos, caja de engranes y acoplamientos, el tren de potencia incluye los sistemas de lubricación y de seguridad necesarios para una transmisión segura y confiable de la potencia, así como equipo eléctrico y electrónico para la transferencia de datos de comportamiento y para el control de la máquina.



Figura 3. Tren de potencia conformado por componentes mecánicos y eléctricos.

El diseño del tren de potencia de la MEM consta de cuatro secciones, integradas por el rotor aerodinámico, la flecha de baja velocidad con su soporte, la caja de engranes con sus soportes y el generador eléctrico. El diseño del rotor aerodinámico incluyó el diseño del cubo y la especificación del sistema de cambio de ángulo de paso (*pitch*) y de las aspas. El cubo es el elemento donde se conectan las aspas del rotor y se lleva a cabo el acoplamiento de éste con la flecha de baja velocidad. El acoplamiento de las aspas al cubo se realiza a través del sistema de cambio de ángulo de paso, el cual es operado, en este caso, por motores eléctricos. El diseño de los componentes mecánicos del aerogenerador está determinado por los resultados del análisis del comportamiento aeroelástico del aerogenerador en su conjunto, es decir, el estudio de los efectos de las fuerzas de excitación debidas a la acción del viento sobre el aerogenerador, en combinación con la respuesta y resistencia de la estructura. La respuesta y resistencia de la estructura son función tanto de las características de viento, como de las propiedades geométricas y físicas de los componentes individuales, así como de la respuesta del sistema eléctrico y electrónico de potencia asociado al diseño del aerogenerador.

Con base en lo anterior, el diseño de componentes como el cubo, la flecha de baja velocidad, el soporte de la flecha de baja velocidad y la selección de rodamientos, incluyó el análisis de los resultados de los cálculos aeroelásticos, obtenidos con el paquete de cómputo especializado PHATAS (*Program for Horizontal Axis wind Turbine Analysis and Simulation*), desarrollado por *The Energy Research Centre of the Netherlands* (ECN). Para la generación de todos los modelos sólidos y los planos de diseño de estos componentes, se utilizó el paquete de cómputo especializado *SolidWorks*.

Asimismo se utilizaron herramientas numérico-computacionales para el desarrollo de los cálculos fluido-dinámicos y para el análisis estructural y de fatiga, dependiendo del tipo de componente y del análisis requerido: para el análisis que implicó la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) se utilizó el paquete de cómputo especializado *Ansys-Fluent*, que implanta el método de volumen finito; para los análisis estructurales se utilizó el paquete de cómputo especializado *Ansys-Mechanical*, que implanta el método de elemento finito, y para los análisis de fatiga se utilizó el paquete de cómputo especializado *nCode*.

El diseño de la torre, del chasis, de los soportes de las zapatas de frenado del sistema de orientación y de las cubiertas de la góndola, requirió del análisis de los resultados de los cálculos aeroelásticos y la utilización de los paquetes de cómputo especializados para el análisis estructural. La torre, en este caso, está constituida por tres secciones tubulares de acero, bridadas, dos rectas y una cónica. El convertidor de frecuencia, los tableros eléctricos y el de control se encuentran ubicados en la primera sección de la torre.

El proceso de selección del conjunto rodamiento y corona dentada para el sistema de cambio de ángulo de paso (*pitch*) y el del sistema de orientación (*yaw*), también requirió de los resultados de las simulaciones de los cálculos aeroelásticos. El sistema de cambio de ángulo de paso y el de orientación en el aerogenerador están accionados por motorreductores, uno por aspa para el caso del ángulo de paso y cuatro unidades para el de orientación.

Tanto el diseño global del aerogenerador, como la selección de componentes mecánicos en el mismo cumplen con la normatividad aplicable y consideran

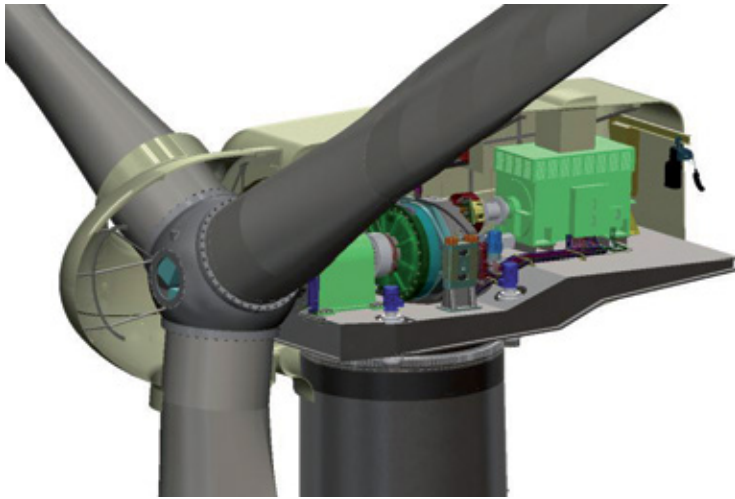


Figura 4. Los componentes mecánicos y eléctricos se encuentran en la parte superior de la torre.

los resultados de la simulación de todos los casos de carga de diseño, definidos en la norma internacional IEC 61400.

Producto de la experiencia adquirida durante el proceso de diseño de la MEM, se desarrollaron y consolidaron capacidades intelectuales y tecnológicas que permiten ofrecer servicios especializados, como modelado y simulación para el análisis aeroelástico de aerogeneradores; diseño mecánico y análisis estructural de componentes mecánicos, incluyendo planos de fabricación; aplicación de herramientas avanzadas de diseño (CFD, FEM) en el análisis y optimización de componentes mecánicos; evaluación de integridad estructural y vida útil de componentes mecánicos; análisis dinámico de rotores de aerogeneradores; diagnóstico de fallas en rodamientos de la flecha principal de aerogeneradores; análisis de aceite de lubricación para el diagnóstico de fallas; cursos de capacitación de mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en la condición, el análisis de vibraciones y el monitoreo de rotores de aerogeneradores; diseño de estrategias de monitoreo y diagnóstico del comportamiento dinámico de rotores de aerogeneradores; diseño y desarrollo de sistemas de monitoreo de la condición de aerogeneradores; servicio de monitoreo y diagnóstico dinámico de aerogeneradores, y especificación de equipos, sensores, actuadores, e integración de sistemas de monitoreo del comportamiento de aerogeneradores.

Caja de engranes

En aerogeneradores mayores que 1 MW se utilizan cajas incrementadoras de diferentes configuraciones y etapas. Las hay de dos o tres etapas en arreglos de engranes planetarios y de ejes paralelos. Los planetarios pueden ser simples o compuestos, con engranes rectos o helicoidales. Asimismo, existen arreglos novedosos desarrollados con cajas de transmisión CVT (*Continuously Variable Transmission*) hidrostáticas o hidrodinámicas. Las transmisiones CVT tienen el objetivo de controlar la velocidad y torque en el eje de entrada del generador. Es importante destacar que conforme se utilizan más etapas planetarias en la conformación de una caja de engranes, el peso y su costo relativo dismi-

nuyen, siendo la opción de tres etapas planetarias una de las mejores opciones para potencias superiores a 2.5 MW. Estudios independientes realizados sobre este tópico muestran que los mejores arreglos dentro de las razones de multiplicación de 1:60 hasta 1:80 son aquéllos que incluyen etapas tipo planetario. La opción que combina etapas planetarias con ejes paralelos es una de las más utilizadas actualmente en aerogeneradores de potencia. La configuración de dos etapas planetarias y una de ejes paralelos (PPH) tiene ventajas de costo, volumen y peso con respecto a la configuración de una etapa planetaria y dos etapas de ejes paralelos (PHH), sin embargo, este último arreglo es mucho más robusto y confiable, y su utilización en reconocidos modelos comerciales de aerogeneradores es muy popular, por lo que para capacidades de alrededor de 1.2 MW, los principales fabricantes de cajas multiplicadoras en el mundo solo manejan esta configuración (PHH). En aerogeneradores de mayor potencia existen tendencias distintas al concepto modular, en las cuales la carcasa de la caja multiplicadora es usada como bastidor para proporcionar una mejor distribución de cargas y aumentar la rigidez estructural del tren de potencia.

Respecto al diseño conceptual utilizado en la MEM, los factores de peso, volumen, costo y popularidad entre los fabricantes de la alternativa PHH fueron decisivos para su elección. El concepto utilizado en el diseño de la caja incorpora una etapa de engranes planetarios helicoidales y dos etapas de ejes paralelos, así como la razón de incremento total de 1:76. A partir de este concepto se realizó la ingeniería básica de la caja multiplicadora. Todos los elementos fueron calculados con base en criterios de fatiga y por esfuerzo extremo (ISO 81400-4), considerando las diferentes opciones de materiales y tecnologías de origen nacional, según disponibilidad y capacidad de proveedores. Como resultado se obtuvo un diseño detallado de todos y cada uno de los componentes que integran la caja multiplicadora y se elaboró la especificación del conjunto de sus sistemas auxiliares (lubricación, enfriamiento del aceite, soportes de montaje, acoplamiento con la flecha de baja velocidad, y freno de disco y mordazas hidráulicas en la flecha de alta velocidad). Los resultados de este diseño se encuentran integrados en el modelo 3D mostrado (figura 5). El peso de la caja incrementadora de la MEM se encuentra en la parte alta del rango para estas potencias y relaciones de transmisión.

El proceso de certificación de la componente y la validación en campo de ésta constituye el principal reto tecnológico. Para estas etapas no solamente se hace necesaria la disponibilidad de prototipos de prueba, sino la disponibilidad de equipo de laboratorio específico para simular la operación de los distintos componentes bajo criterios particulares de la norma IEC 61400-22. El envío de un prototipo de la caja de engranes a laboratorios especializados para la ejecución de pruebas es una opción que deberá ser evaluada en su momento. La consolidación de conocimientos desarrollados durante el diseño de este componente crítico del aerogenerador habilita al equipo de especialistas involucrados, para ofrecer servicios de análisis integral, consultorías, adaptación de componentes y mantenimiento de las transmisiones instaladas en los parques eólicos de México.

Generador eléctrico

Desde el inicio del desarrollo de los modernos aerogeneradores, diferentes esquemas de generación eléctrica se han implementado y puesto a prueba. Actualmente, a nivel mundial se utilizan dos tipos de generadores eléctricos: el tradicional generador asíncrono, del tipo jaula de ardilla o tipo rotor devanado (doble alimentado) y el generador síncrono del tipo rotor devanado o tipo imanes permanentes.

Para la selección del generador eléctrico, el grupo de especialistas realizó un análisis detallado de las ventajas y desventajas de los diferentes esquemas de generación y el tipo de generador utilizado en cada uno de ellos. La selección del generador para la MEM se basó en criterios tales como: a) Características operacionales conocidas, tanto en estado estable como transitorio, en aplicaciones convencionales y extrapolable a su aplicación en aerogeneradores; b) Diseño sin propietario industrial y c) Factibilidad de fabricación nacional. Como resultado de este análisis se seleccionó un generador tipo síncrono de 1500 kW de capacidad, rotor tipo polos salientes, excitación tipo sin escobillas, velocidad de 1800 rpm y tensión de generación de 690 volts. Debido a las características particulares de operación de este generador (frecuencia variable y tensión de generación constante) se realizó el diseño y el análisis electromagnético, utilizando programas computacionales desarrollados por el

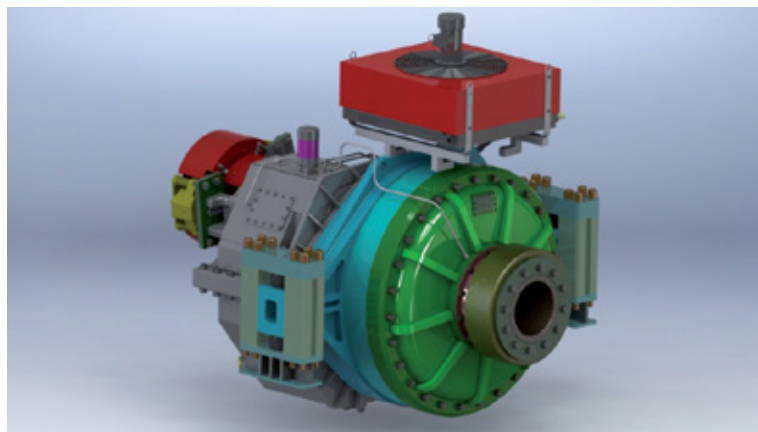


Figura 5. Diseño de los componentes que integran la caja multiplicadora.

IIE, incorporando requerimientos particulares de la operación del aerogenerador. Adicionalmente se integró el paquete de ingeniería que incluye la especificación técnica, la documentación para la instalación y pruebas de puesta en servicio y operación. El desarrollo y consolidación de capacidades del grupo de especialistas en generadores eléctricos para aplicación en turbinas eólicas dentro del proyecto de la MEM, permite al IIE proporcionar apoyo técnico para la elaboración y revisión de especificaciones técnicas, así como la selección de generadores para aplicación en aerogeneradores, al igual que la supervisión de pruebas en fábrica, de instalación, puesta en servicio, operación y mantenimiento, y la capacitación del personal involucrado en estas actividades.

Convertidor electrónico de frecuencia

La contribución de la electrónica de potencia al avance tecnológico en el mundo moderno ha sido estratégica. El sector eoloelectrico es uno de los nichos más desafiantes de esta disciplina, debido a la variabilidad del viento, la confiabilidad demandada para el equipo y los requisitos cada vez más estrictos en cuanto a la calidad de la energía que el aerogenerador debe entregar a la red eléctrica en el punto de interconexión (PI). En este escenario, la selección y especificación del convertidor electrónico de potencia implica un reto tecnológico importante, dado que no solamente se requiere de un convertidor de frecuencia variable a fija, sino que esto tiene que hacerse de manera confiable y eficiente, ante variaciones normales y anormales en la red eléctrica, sin afectar la calidad de la energía en el punto de interconexión. Para cubrir los requerimientos del diseño de la MEM se utiliza un convertidor de frecuencia de potencia completa (*back-to-back*) basado en un rectificador controlado del lado del generador eléctrico y un inversor de potencia del lado de la red. La especificación del convertidor es el resultado de la identificación y análisis de ventajas y desventajas técnico-económicas de diferentes productos en el mercado, sobre todo en el tema del código de red vigente y en especial la respuesta del convertidor ante huecos de tensión del lado de la red eléctrica. La especificación desarrollada cubre la condición más estricta en cuanto a huecos de tensión (*Zero Voltage Ride Through, ZVRT*) y engloba las principales características y parámetros técnicos de las variables que garantizan la correcta operación y permiten

supervisar ésta con propósitos de control. La figura 6 muestra el diagrama a bloques del convertidor.

Protecciones eléctricas

Las fallas de los componentes eléctricos representan una porción importante en las salidas de los aerogeneradores. Las funciones de protección en los circuitos eléctricos se utilizan con el objeto de limitar el daño a los principales componentes de un aerogenerador. Estas funciones responden ante condiciones anormales como cortocircuitos, sobrecargas y sobretensiones. Los principales componentes que se protegen son el generador eléctrico, el cable de bajada y el transformador, así como la electrónica de potencia asociada. Las funciones de protección comúnmente encontradas en los aerogeneradores son las de sobre y baja tensión (59 y 27), sobre y baja frecuencia (81 O/U) y sobrecorrientes debidas a fallas de fase a tierra y entre fases. El esquema de protección se completa con la inclusión de fusibles limitadores de corriente en el lado primario del transformador. La figura 7 muestra la configuración del circuito eléctrico de potencia en la MEM.

Las funciones de protección utilizadas en la MEM son: sobre y baja tensión, sobre y baja frecuencia, y de desbalance o contenido de secuencia negativa (46). Para el **lado transformador** del convertidor de frecuencia, estas funciones están contenidas en el interruptor de potencia de baja tensión, además de las protecciones contra fallas entre fases y a tierra (50/51, 50/51N). Para el **lado generador** del convertidor de frecuencia, estas funciones las ofrece el propio

convertidor. Para el primario del transformador se utiliza un relevador autoalimentado que incluye las funciones de protección contra sobrecorrientes, debidas a fallas entre fases y de fase a tierra (50/51, 50/51N). Este esquema ofrece mayor flexibilidad para la protección del transformador y elimina la problemática asociada para la protección ante bajas corrientes de falla. El esquema incorpora además, una función de protección contra sobrecorriente a la salida del generador.

Sistema de control

La disponibilidad, confiabilidad, eficiencia y durabilidad de un aerogenerador, así como su seguridad y autonomía de operación, dependen de la funcionalidad y de las cualidades del sistema de control, el cual es el cerebro del aerogenerador y en su diseño se debe tomar en cuenta que se trata de una turbomáquina con grandes estructuras flexibles y fuertes acoplamientos entre sus subsistemas mecánico, eléctrico y electrónico, que debe trabajar bajo condiciones ambientales variables, que estará sujeta a variaciones importantes y aleatorias de la carga que alimenta. Por estas razones es que se requiere desarrollar sistemas de control de alto desempeño, incorporando la tecnología más efectiva en costo y los métodos de control más avanzados que resuelvan la problemática de maniobrabilidad, estabilidad y desempeño.

Físicamente, el sistema de control está integrado con tecnología de punta. El equipo principal es un *Programmable Logic Controller* (PLC) de última generación, con tarjetas de procesamiento redundantes y unidades de E/S remotas. Para evitar la interferencia electromagnética, los enlaces de comunicación entre la góndola y la base del aero-

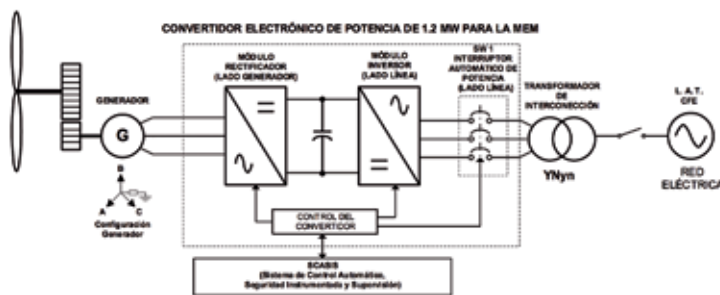


Figura 6. Diagrama a bloques del convertidor.

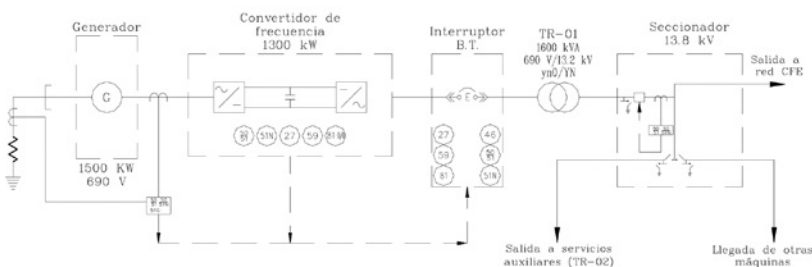


Figura 7. Configuración del circuito eléctrico de potencia.



generador, y entre el aerogenerador y el cuarto de control, se hacen por fibra óptica. Se cuenta con interfaces de operación modulares y configurables en el cuarto de control, en la base de la torre y en la góndola, que brindan acceso pleno y consistente a la información y los datos del aerogenerador, conforme al tipo de usuario. Los servomecanismos de posicionamiento de las aspas y de orientación de la góndola incorporan *drivers* electrónicos de última generación con motores eléctricos.

Funcionalmente, el control de la MEM está compuesto por un sistema de control secuencial (SCS) y un sistema de control regulatorio (SCR). El SCS se encarga básicamente de automatizar la operación del aerogenerador, recibe los comandos de operación, verifica el cumplimiento de permisos y genera las acciones para llevar al aerogenerador a los diferentes estados de operación de manera autónoma, vigilando las situaciones de emergencia y las condiciones de seguridad. El SCS de la MEM considera los estados operativos: disponible, marcha, listo, generando y fuera de servicio que incluye paro, emergencia y mantenimiento. El SCR proporciona la funcionalidad para capturar la energía disponible en el viento, limitar las cargas mecánicas dinámicas, mitigar las cargas electromagnéticas transitorias y cumplir con los requerimientos del código de red en el punto de interconexión (PI). El SCR incluye los esquemas

de control retroalimentado de la turbina eólica, del generador eléctrico y del convertidor electrónico de potencia. El control de la turbina incluye: a) el control de orientación de la góndola que alinea el eje del rotor con la dirección del viento para aprovechar mejor la energía disponible en el viento y minimizar los esfuerzos en los componentes mecánicos y b) el control de posición de aspas que ajusta el ángulo de ataque, en función de la velocidad del viento para cambiar el par aerodinámico producido y regular la potencia generada por la turbina, la cual opera a velocidad variable y ángulo de paso fijo para velocidades de viento por debajo de la velocidad nominal, para maximizar la captura de energía y a velocidad constante y ángulo de paso variable para velocidades de viento por arriba de la velocidad nominal. En esta región se tienen las estrategias de operación a potencia y a torque constantes. A torque constante se reducen los esfuerzos mecánicos de los componentes del tren de potencia, reduciendo el número de fallas y el mantenimiento.

Conclusiones

El mejoramiento del diseño del sistema de control debe tomar explícitamente en cuenta las no linealidades y el acoplamiento de los subsistemas mecánico, eléctrico y electrónico, los problemas de estabilidad y resonancia, la reducción de cargas y de esfuerzos mecánicos y electromagnéticos, los requerimientos de confiabilidad y disponibilidad, etc.

Adicionalmente, el creciente nivel de penetración de la energía eoloelectrónica en las redes eléctricas ha creado nuevos retos técnicos: respuesta a huecos de tensión, control de frecuencia y potencia activa, regulación de voltaje y potencia reactiva, entre otros. Esto ha resultado en una necesidad urgente de valorar el uso de métodos de control no lineal, técnicas adaptativas, metodologías robustas, leyes predictivas, control multivariable y control inteligente, entre otros.

RAÚL GONZÁLEZ GALARZA

[rgg@iie.org.mx]

Ingeniero Mecánico Electricista por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Laboró en la industria metal-mecánica de 1977 a 1984. Es investigador en la Gerencia de Energías No Convencionales (GENC-IIE) donde dirige y colabora en proyectos vinculados con el desarrollo y aplicación de sistemas convertidores de energía. Desde 1984 participa y dirige proyectos de desarrollo tecnológico en el área de energías renovables. Ha impartido numerosos cursos de actualización y diplomados, y ha publicado artículos técnicos y de difusión sobre el aprovechamiento de la energía eólica y solar-fotovoltaica. Fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México.

JOSÉ MANUEL FRANCO NAVA

[jmfranco@iie.org.mx]

Doctor en Filosofía por la Universidad de Cranfield en 2004. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica y Diploma de *Imperial College* en el *Imperial College of Science and Technology* por la Universidad de Londres en 1994. Ingeniero Mecánico con especialidad en Energética por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en 1982. Desde 1983 se desempeña como investigador y Jefe de Proyecto en la Gerencia de Turbomaquinaria (GTM) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Ha trabajado en diagnóstico de fallas, desarrollo de sistemas informáticos para mantenimiento predictivo, análisis dinámico, análisis modal (teórico y experimental), análisis de mecánica de fractura y evaluación de vida útil aplicando técnicas numérico-computacionales como análisis de elemento finito, elemento frontera, dinámica de fluidos computacional en análisis del comportamiento, optimización de componentes de turbomaquinaria, análisis del proceso de captura de CO₂ y análisis técnico económico de proyectos de conversión de unidades de generación eléctrica (de combustóleo a carbón). Fue miembro del SNI y ha publicado 44 artículos en congresos nacionales e internacionales. Tiene tres derechos de autor registrados. Ha impartido cursos especializados a personal de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Petróleos Mexicanos (PEMEX) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

FRANCISCO ANTONIO CARVAJAL MARTÍNEZ

[carvajal@iie.org.mx]

Maestro en Ciencias por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en 2003. Diploma de especialidad en Generadores de inducción por la Nottingham Trent University en Inglaterra en 1991. Ingeniero Industrial Electricista por el Instituto Tecnológico de Veracruz en 1982. Ingresó como investigador al área de Máquinas Eléctricas Rotatorias de la Gerencia de Equipos Eléctricos (GEE) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en 1984. Su área de investigación incluye los aspectos relacionados al diseño, operación y diagnóstico de motores y generadores de gran capacidad. Ha dirigido proyectos para Petróleos Mexicanos (PEMEX), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y usuarios privados. Actualmente realiza trabajos de investigación para el desarrollo e implementación de metodologías de análisis y medición de eficiencias de generadores operando en plantas hidroeléctricas. Ha sido profesor en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en la Facultad de Ciencias Químicas e Industriales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Es autor de varios artículos nacionales e internacionales dentro del área de Máquinas Eléctricas Rotatorias.

JOSÉ LUIS SILVA FARIÁS

[jsilva@iie.org.mx]

Maestro en Ingeniería con la especialidad de Sistemas Eléctricos de Potencia por el ITESM, campus Monterrey en 1989. Ingeniero Electricista por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en 1982. Ingresó al IIE en 1985 a la Gerencia de Transmisión y Distribución. Sus principales tópicos de investigación son la protección contra sobre corrientes en sistemas eléctricos industriales, protección de redes eléctricas de alto y extra alto voltaje, y confiabilidad en redes de distribución. Ha dirigido proyectos para Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).



De izquierda a derecha: Raúl González Galarza, Raúl Garduño Ramírez, José Luis Silva Farías, Humberto Raúl Jiménez Grajales y José Manuel Franco Nava.

HUMBERTO RAÚL JIMÉNEZ GRAJALES

[hjimenez@iie.org.mx]

Maestro en Electrónica de Potencia en la línea de investigación de calidad y ahorro de energía, por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en 2002. Obtuvo el Primer lugar en el XVI Concurso Nacional de Creatividad (2001) y en el Certamen Nacional de Ciencia y Tecnología (2002), con el proyecto de maestría: inversor fotovoltaico interconectado a red con funciones de filtro activo integradas. Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en 1998. Realización de Residencia Profesional en la Gerencia de Control e Instrumentación y participación en el XIII Grupo de Adiestramiento en Investigación Tecnológica en la Gerencia de Equipos Eléctricos, ambas en el IIE en 1998. Ingresó a la Gerencia de Energías No Convencionales (GENC) del IIE en noviembre de 2001, donde se ha desempeñado como investigador en la línea de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica, en proyectos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico. Ha impartido cursos de especialización en su área para sectores como el energético, académico y de la iniciativa privada. Desde 2011 es instructor del Centro de Posgrado del IIE. Asimismo ha dictado conferencias a nivel nacional y tiene publicaciones afines a su línea de investigación.

RAÚL GARDUÑO RAMÍREZ

[rgarduno@iie.org.mx]

Doctor en Filosofía por la *Pennsylvania State University* en el año 2000. Maestro en Ciencias por el CINVESTAV-IPN en 1987. Diplomado por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Mecánica de Japón en 1986. Ingeniero Electricista por la ESIME-IPN en 1985. Desde 1987 trabaja en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en la Gerencia de Control, Electrónica y Comunicaciones, en donde ha desarrollado sistemas de control para diversas unidades generadoras de energía eléctrica. Sus áreas de investigación incluyen sistemas inteligentes de control, optimización dinámica multiobjetivo y control digital de turbogeneradores. Es autor del libro: *Fossil-Fuel Power Plant Control: An Intelligent Hybrid Approach*, y coautor del libro *Modelado Integrado de un Turbogenerador: Análisis, Simulación y Compensación*. Ha publicado cinco capítulos de libros y más de ochenta artículos técnicos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), del Sistema Estatal de Investigadores (SEI) de Morelos y *Senior Member* del IEEE.