

# PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

## PROYECTO NÚMERO P03

### 1. Título

Diseño de rotores para aerogeneradores de eje horizontal, con incorporación de una de tres opciones de innovación aeroelástica, incluyendo construcción y prueba de una sección.

### 2. Tipo de proyecto

Investigación aplicada

### 3. Instituciones y empresas participantes

<b>Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)</b>
Número de RENIECYT: 192
Avenida Playa Pie de la Cuesta No. 702, Fraccionamiento Habitacional Desarrollo San Pablo, CP 76130
Santiago de Querétaro, Querétaro

### 4. Líder técnico

Hugo Gámez Cuatzin	CVU: 67870	Grado máximo: Post-Doctorado
		Es miembro del S.N.I. =NO
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)		
<b>Perfil.</b> - Es Ingeniero en Electrónica Especialidad Instrumentación y Doctor en Dispositivos de Electrónica Integrada. Realizó Post-Doctorado como Coordinador de consorcio académico de 7 entidades, para un proyecto financiado por Región Rhone Alpes, Francia. Cuenta con Certificación PMP-PMI en Dirección de Proyectos. Es Diplomado en Comercio Internacional e Ingeniería de Negocios Internacionales por el Centro de Estudios Superiores en Comercio Internacional CESC, París, Francia.		
Estudios: IT-Orizaba, CINVESTAV, Lyon Francia		

### 5. Líder administrativo

C.P. Oscar Edmundo Lozano Garza

## PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

### 6. Principales participantes del equipo de trabajo

Hugo Gámez Cuatzin	CVU: 67870	Grado máximo: Post-Doctorado Es miembro del S.N.I. =NO
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)		
<p><b>Perfil:</b> Es Ingeniero en Electrónica Especialidad Instrumentación y Doctor en Dispositivos de Electrónica Integrada. Realizó Post-Doctorado como Coordinador de consorcio académico de 7 entidades, para un proyecto financiado por Región Rhone Alpes, Francia. Cuenta con Certificación PMP-PMI en Dirección de Proyectos. Es Diplomado en Comercio Internacional e Ingeniería de Negocios Internacionales por el Centro de Estudios Superiores en Comercio Internacional CESCI, París, Francia.</p>		
Estudios: IT-Orizaba, CINVESTAV, Lyon Francia		

Diego Ernesto Cárdenas Fuentes	CVU: 40783	Grado máximo: Doctorado Es miembro del S.N.I. = SI-C
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)		
<p><b>Perfil:</b> Es Ingeniero Mecánico Eléctrico y Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Terminó su doctorado en 2011, con especialidad en energía eólica. Fue asistente de investigación en el Fraunhofer Institute of Production Technology en Aachen, Alemania. Fue asistente de investigación en GE: Centro de Manufactura y Tecnología, en Monterrey N.L.</p>		
Estudios: ITESM y UT-Hamburgo Alemania		

Pedro Augusto Reséndiz González	CVU: 354163	Grado máximo: Licenciatura Es miembro del S.N.I. = NO
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)		
<p><b>Perfil.-</b> Es Ingeniero Mecánico. En 2011 obtuvo Certificate of International Leadership Training in Renewable Energies and Energy Efficiency en Hochschule. Colaboró en un proyecto de diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 3m de diámetro.</p>		
Estudios: IT-Querétaro		

Hugo R. Elizalde Siller	CVU: 43672	Grado máximo: Postdoctorado Miembro del S.N.I. = SI-N1
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey		
<p><b>Perfil.-</b> Es Ingeniero Mecánico Eléctrico y Doctor en Dinámica Estructural. Realizó su estancia posdoctoral en el Imperial College de Londres sobre dinámica estructural. Es especialista en Mecánica computacional (FEM, CFD, Interaction).</p>		
Estudios: ITESM, U-Nebraska-Lincoln, USA-Imperial College London		

Guillermo Muñoz Hernández	CVU: 202217	Grado máximo: Doctorado Miembro del S.N.I. = NO
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)		
<p><b>Perfil.-</b> Es Ingeniero Mecánico Agrícola, Maestro en Ingeniería Mecánica y Doctor en Ciencia y Tecnología. Es Co-Autor de una patente. Premio a Innovación y Diseño Querétaro 2007 (CANACINTRA).</p>		
Estudios: UA-Chapingo, U-GTO y CIDESI		

## PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

Josué Gómez Parada	CVU: 163692	Grado máximo: Doctorado
		Miembro del S.N.I. = NO
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)		
<b>Perfil.-</b> Es Ingeniero Mecánico –Eléctrico y Doctor en Ingeniería, Aerodinámica. Tiene experiencia en dinámica de fluidos, turbomaquinaria y aerodinámica.		
Estudios: ITESM, Cranfield University		

Eduardo Macías Ávila	CVU: 31302	Grado máximo: Doctorado
		Miembro del S.N.I. = NO
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)		
<b>Perfil.-</b> Es Ingeniero Industrial Químico, Maestro en Metalurgia y Doctor en Ingeniería Metalúrgica. Su especialidad es la transferencia de calor.		
Estudios: CINVESTAV- Saltillo.		

José Ángel Segura Victorino	CVU: 43672	Grado máximo: Doctorado
		Miembro del S.N.I. = NO
<b>Perfil.-</b> Es Ingeniero Mecánico, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica y Doctor Tecnología Mecánica. Su especialidad es el diseño mecánico. Fue Coordinador Técnico en el Departamento de Petroquímica de la Academia Nacional de Investigación y desarrollo.		
Estudios: IT-Orizaba, CENIDET, CIICAP.		

### 7. Antecedentes

Diversos centros de investigación alrededor del mundo, públicos y privados han lanzado programas de investigación con el propósito de incrementar la eficiencia y disminuir los costos de la tecnología de turbinas eólicas. Estos programas son de importancia porque a partir de sus resultados se puede tener un impacto positivo desde el punto de vista de la reducción de costos de esta tecnología, haciéndola progresivamente más competitiva frente a otras fuentes de producción de energía. Una manera adicional de coadyuvar en ese sentido, es investigar y desarrollar conceptos que permitan la utilización de palas de mayor tamaño, que pesen menos, que sean más eficientes aerodinámica y estructuralmente y que transmitan cargas reducidas al sistema. Dentro de los diferentes temas que se analizan en los programas antes mencionados, se han identificado tres áreas de interés dentro del diseño y optimización de rotores eólicos que se adecuan a los intereses y capacidades de CIDESI, estos son:

#### **Perfiles aerodinámicos de parte posterior plana (Flatback Airfoil).**

El uso de perfiles aerodinámicos muy gruesos con el espesor del borde de arrastre aumentado en la raíz de la pala puede mejorar la capacidad estructural de las palas. Se ha demostrado que los perfiles gruesos con borde de arrastre romo tienen excelentes características de sustentación que son mucho menos sensibles a la suciedad superficial que los perfiles de borde de arrastre agudo de igual espesor.

Estos perfiles tienen el potencial de disminuir los costos de generación de energía debido a que sus secciones más gruesas permiten palas más ligeras (mayor momento de inercia) y el incremento en las características de sustentación pueden permitir mejoras en el desempeño de los rotores.

## PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

---

Los riesgos técnicos asociados al uso de perfiles de parte posterior plana para la región interna de la pala son el aumento del arrastre y ruido aerodinámicos. Ambos efectos son el resultado de la forma roma del perfil de arrastre y la estela producida por esta forma. El efecto de esta sanción del arrastre en el coeficiente de torque y de empuje del rotor para ángulos típicos de torcimiento en la sección interna de la pala no es severo y puede ser compensado por la sustentación adicional que el perfil de parte posterior plana genera.

### **Control pasivo de cargas mediante aeroelastic tailoring.**

Las turbinas eólicas deben ser diseñadas para soportar la naturaleza estocástica del viento. Los sistemas de control de paso en posición bandera (feather) se utilizan para desaprovechar la energía eólica por encima de la velocidad de viento nominal. Sin embargo, estos sistemas de control están limitados por el tiempo de reacción del sistema. Cambios repentinos en las condiciones del viento, pueden llevar a incrementos en las cargas antes de que el sistema de control sea capaz de responder.

Las palas de turbinas eólicas de material compuesto tienen el potencial para la reducción pasiva de cargas debido a su estructura de fibras de material compuesto. Al utilizar el potencial de acoplamiento en los materiales de fibra, una turbina eólica puede ser adaptada para torcerse bajo la deflexión. Este acoplamiento es posible mediante la alteración de los ángulos de las fibras en el material preparando la rigidez de flexión de la pala de la turbina. La relación dinámica entre el movimiento de pandeo y de torsión de los materiales compuestos es denominado “bend-twisting coupling” o “aeroelastic tailoring”.

Al crear una pala que se tuerce hacia la posición bandera al tiempo que se flexiona hacia la torre, esta disminuye su ángulo de ataque. El ángulo de ataque reducido disminuirá las fuerzas de sustentación y de arrastre a lo largo de la pala, por tanto disminuyendo las cargas.

### **Control activo de cargas con microtabs.**

El control de cargas puede establecerse mediante el control de paso de las palas de manera individual o colectiva. Una metodología alterna que presenta algunas ventajas sobre el control de paso es el uso activo de dispositivos aerodinámicos. Estos dispositivos tienen el potencial de reducir las cargas de fatiga en las palas de turbinas a niveles por debajo de los de la tecnología actual de control de paso activo. Los dispositivos de control distribuidos pueden responder a cargas locales mientras el control de paso mueve la pala entera basado en una medición de carga integrada, como el torque por ejemplo. Los dispositivos activos de control aerodinámico que son los más efectivos en el control de cargas, resultan ser aquellos que alteran el arqueado (camber) efectivo de la pala. La teoría de perfiles aerodinámicos delgados muestra que estos dispositivos son más efectivos cuando se instalan en el borde de arrastre de la pala.

Las micro-pestañas (microtabs) son particularmente atractivas debido a su forma simple y rápida respuesta. Las pestañas son situadas típicamente y aproximadamente perpendiculares a la superficie del perfil a una altura que es casi igual al espesor de la capa límite (1-2% de la cuerda). El despliegue altera efectivamente el arqueado, y aplicado en el lado de presión del perfil incrementa la sustentación, mientras que en el lado de succión, mitiga la sustentación.

# PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

---

## REFERENCIAS

- Ashwill. T.D. “Materials and Innovations for Large Blade Structures: Research Opportunities in Wind Energy Technology,” AIAA-2009-2407, 50th AIAA Structures, *Structural Dynamics, & Materials Conference*, Palm Springs, May, 2009.
- Deilmann, Christian. “Passive aeroelastic tailoring of wind turbine blades - A numerical analysis -”. Thesis Advisor: Klaus-Jürgen Bathe. Master Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering. September 2009.

## 8.- Objetivos y metas

Se realizará investigación en temas de diseño avanzado de palas de rotor que busquen mejorar el comportamiento mecánico e incrementar la eficiencia de rotores utilizando técnicas de control pasivas y activas. Se utilizará como base el diseño de una pala de 9 m de longitud para vientos clase IIIb (según la clasificación de la norma internacional IEC 61400). Se analizará virtualmente, mediante software de modelación y simulación especializado, el efecto sobre el desempeño del rotor al incorporar independientemente los siguientes tres elementos:

- Perfiles aerodinámicos de parte posterior plana (Flatback Airfoil).
- Control pasivo de carga usando el acoplamiento flexión-torcimiento (Bend-twist coupling o Aeroelastic tailoring).
- Micro-pestañas (Microtabs).

Adicionalmente, se fabricará un espécimen de material compuesto o una sección de pala para realizar la validación de diseño resultante del estudio en el tema de Aeroelastic tailoring

## 9.- Contenido innovador

La búsqueda de métodos que mejoran el rendimiento aerodinámico de las láminas de turbina de viento es un trabajo de mejora continua e innovación en el ámbito global, debido a los beneficios que puede tener sobre la industria eólica.

## 10.- Principales resultados esperados lista de entregables

- Los principales resultados esperados son:
  - Métodos para incorporar una opción de diseño de innovación aeroelástica de rotores de turbinas de viento (los cuales hacen mejor análisis entre tres opciones).
  - Construcción y pruebas de un prototipo.
  - Solicitud de patente.
  - Formación de recursos humanos (tesis).
- La lista de entregables asociada a cada actividad y a cada etapa se muestra en el **Apéndice No. 3**

# PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

---

## 11.- Metodología propuesta

- En primera instancia, se diseñará una pala para un rotor que sea capaz de aprovechar vientos clase IIIb (según la clasificación de la norma internacional IEC 61400).
- Se llevará a cabo una investigación sistemática sobre el uso de una serie de perfiles internos (cercanos a la raíz) cuyo espesor y borde de arrastre romo puedan ser ajustados independientemente para dar un espesor constante a la curva del borde de arrastre y al refuerzo estructural interno.
- Se desarrollarán modelos dinámicos de la turbina con herramientas dedicadas de simulación que validarán el concepto en las primeras etapas y validaran los diseños de palas en las etapas finales de la investigación.
- El modelado por elemento finito de las palas será usado como una herramienta de diseño para calcular la rigidez de la pala necesaria para las simulaciones dinámicas.
- Los modelos de elemento finito también serán usados para crear modelos realistas de palas usando las cargas generadas por las simulaciones dinámicas.
- Finalmente, se procederá con la fabricación de un espécimen de material compuesto y de una sección de pala que será usada para validar los modelos de elemento finito usados en la investigación.

### Herramientas de simulación que se usarán:

- XFOIL de Mark Drela,
- MIT Aero & Astro Harold Youngren, Aerocraft , Inc;
- FOCUS6 del ECN, Holanda;
- ANSYS BLADE Modeller y
- ANSYS para materiales compuestos;
- Alternativamente FiberSIM de Siemens .

La validación se realizará en túnel de viento, con los perfiles aerodinámicos propuestos. La confirmación de los coeficientes de sustentación, coeficiente de arrastre, curvas de presión y succión; constituyen la validación para su liberación en rotores eólicos, a través del método BEM (Blade Element Momentum).

## 12.- Cronograma de actividades

El cronograma de actividades se incluye en el **Apéndice No. 1**

## 13.- Desglose financiero

El desglose financiero se incluye en el **Apéndice No. 2**

## PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

---

### 14.- Justificación del gasto

<b>Rubro 9.1</b>
Investigadores asociados y apoyo a estudiantes. Concurrentes: Costo horas-hombre del personal del CIDESI dedicado al desarrollo del proyecto.
<b>Rubro 9.2</b>
Reuniones con el grupo directivo del CEMIE y con el prestador de servicios externos. Asistencia a congresos internacionales de energía eólica.
<b>Rubro 9.3</b>
Acceso a publicaciones científicas, libros y normas. Insumos para fabricación de una sección de pala hecha de materiales compuestos. Publicación de artículos científicos. Fabricación de molde para manufactura de sección de pala.
<b>Rubro 9.4</b>
Licencias de software de diseño CAD con capacidades avanzadas de manejo de superficies complejas del tipo aeroespacial. Equipo de cómputo para modelación CAD y modelos de FEM y CFD. Software especializado para el diseño de componentes de turbinas eólicas. Software especializado para el análisis de materiales compuestos y la optimización de palas de rotores.
<b>Rubro 9.5</b>
Asesoría especializada en temas de aerodinámica y aeroelasticidad.
<b>Rubro 9.6</b>
Estudio de propiedad intelectual y solicitud de modelo de protección de la propiedad intelectual.
<b>Rubro 9.7</b>
Informes semestrales de gastos auditado

### 15.- Impactos, oportunidades, caso, plan o modelo de negocios y/o mecanismos de transferencia.

#### Impacto científico

El proyecto sentará bases científicas robustas para el desarrollo en México de rotores de aerogeneradores capaces de funcionar de manera eficiente en regímenes de vientos de la Clase III, utilizando metodologías basadas en estudios aerodinámicos y aeroelásticos de las palas. Se generará nuevo conocimiento en el ámbito nacional sobre el tema de perfiles aerodinámicos con mejores eficiencias, reducción de ruido, y reducción de flujos turbulentos, lo cual constituye las bases científicas para la incorporación y mejora de palas eólicas. En otras palabras se generará conocimiento nuevo para el desarrollo de rotores aerodinámicos de aerogeneradores capaces de aprovechar de manera eficiente vientos relativamente bajos. En México, hay una gran cantidad de áreas en diferentes entidades federativas del país en donde se conoce que hay recurso eólico relativamente bajo que podría aprovecharse con aerogeneradores Clase III. Hasta ahora en México sólo se está aprovechando el recurso eólico en sitios donde el régimen de viento es muy intenso, intenso o de media intensidad, pero los regímenes de viento relativamente bajos aún no se están aprovechando, lo que constituye un nicho de oportunidad en el ámbito nacional.

## PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

---

### Impacto económico

De acuerdo al último estudio de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), México cuenta con un potencial eólico superior a los 50 GW con factores de carga superiores al 20%. Al analizar las proyecciones de costos de la energía eólica y de las centrales de gas de ciclo combinado (CCGT), existe un potencial de aprovechamiento de la energía eólica de entre 10 y 20 GW en 2020 que son competitivos respecto a las CCGT y que están en función de la evolución de los precios del gas natural. Conservadoramente, se propone el desarrollo de un Plan Nacional que permita el aprovechamiento de 12 GW eólicos a 2020.

El aprovechamiento de 12 GW eólicos competitivos implica un impacto en el PIB de en torno a 167,000 MDP, lo que equivale al 1.1% del PIB del año 2011, generando además cerca de 48,000 empleos, de manera directa o indirecta sobre la práctica totalidad de los sectores de la economía mexicana.

A medida que se desarrolla nueva capacidad se puede generar un tejido industrial que incremente la participación de componentes nacionales en las inversiones. Con el fin de no penalizar los costos de generación, limitar la competencia y crear una industria cortoplacista que no tendrá continuidad se requieren desarrollar más requerimientos de contenido local en el sector, es decir, la creación de una cadena de autoabastecimiento en México. El desarrollo de una cadena de suministro es gran reto pero puede traer grandes recompensas al involucrar industrias como la siderúrgica, metalúrgica, fibra de vidrio y carbono, construcción, operador de redes, software e incluso la banca.

Según un estudio de IFC (International Finance Corporation) con datos de MKE Consulting, algunas oportunidades en México (en las que existe una ventaja local) para manufacturar y proveer localmente componentes para la cadena de suministro de la industria eólica se presentan en: las palas de rotores, generadores, componentes fundidos y forjados y por supuesto las torres debido a que son difíciles de transportar. Particularmente, la oportunidad en la manufactura de palas se debe a que se han instalado en el país empresas de este ramo y a que la capacidad de producción de estos componentes en América no está saturada.

Cada vez más empresas trasnacionales pertenecientes al sector de energías renovables, están prefiriendo invertir en México, considerándolo un destino atractivo y confiable. Tanto desarrolladoras de proyectos como empresas proveedoras de equipo ya cuentan con presencia en el país. Así mismo, diversas firmas nacionales han entrado al mercado local en materia de desarrollo de proyectos en pequeña escala, manufactura y comercialización de equipo renovable y/o han decidido diversificar sus negocios hacia el sector de energía sustentable. Por ejemplo en el ramo de la fabricación de palas, podemos mencionar a Mitsubishi Heavy Industries de México, S.A. de C.V. que produce palas en Ciudad Juárez para exportación al mercado eólico de los Estados Unidos. También la empresa Vientek (empresa conjunta de Mitsubishi y TPI Composites) se dedica a la producción de palas para turbinas. Adicionalmente, existen empresas establecidas en México que están dedicadas a la manufactura de elementos en fibra de vidrio de gran tamaño, como las que manufacturan componentes para autobuses de pasajeros o para aeronaves; IRIZAR, AERNNOVA y FIBERGRATE solo por mencionar algunas. Debido a su experiencia en la fabricación y uso de piezas de materiales compuestos, estas empresas podrían expandir su cartera de productos con cierta facilidad para incluir la manufactura de palas para rotores eólicos.

## PROYECTO APROBADO PARA EL CEMIE-EÓLICO

---

En resumen, mediante los resultados obtenidos de este proyecto, CIDESI podrá potenciar su capacidad de volverse un agente impulsor del desarrollo de la industria eólica en el país, en específico, en lo referente al diseño y manufactura de palas de rotores, esto mediante la prestación de servicios de ingeniería y el desarrollo de conceptos innovadores para las empresas del país que ya se encuentran en este ramo o que potencialmente podrían incursionar en el.

Por otro lado, el alcance de este proyecto referente a la fabricación de un espécimen de material compuesto o una sección de pala para realizar la validación de diseño del estudio de implementación de Aeroelastic tailoring puede ligarse naturalmente con otro de los proyectos que CIDESI propone en el marco de esta convocatoria, el cual plantea el desarrollo y construcción de una técnica robotizada para la fabricación de segmentos de pala de material compuesto. Es decir, se podrá utilizar el desarrollo del proyecto de sistema robotizado para fabricar la sección de pala que resulte de la investigación del tema de control pasivo de cargas usando el acoplamiento flexión-torcimiento. Esto además de suponer una ventaja de logística y operación, presenta ventajas técnicas, pues mediante la técnica robotizada se tiene un control muy preciso en el acomodo de fibras de la pala, lo que es esencial para lograr una buena implementación de la técnica *aeroelastic tailoring*.

### Mecanismo de transferencia

De acuerdo con lo que fue declarado en el Plan Estratégico del CEMIE-Eólico sobre los proyectos estratégicos, su principal propósito debe ser generar y consolidar capacidades nacionales, así como fomentar la vinculación institucional, la formación de recursos humanos y la vinculación con empresas del sector privado. Se buscará que los resultados de este proyecto constituyan la base para la transferencia tecnológica a través de licenciamiento hacia empresas de base tecnológica (EBT), de acuerdo con lo siguiente:

- a) Licenciamiento de paquetes tecnológicos para la manufactura de palas de tamaño pequeño (< 150 kW).
- b) Licenciamiento de servicios de inspección de palas, bajo normatividad IEC 61400.

En estos temas, CIDESI ofrecerá servicios tecnológicos para el sector eólico ya operativo o en desarrollo. La oferta de estos servicios iniciará en la octava etapa del proyecto, una vez que el nuevo conocimiento se haya generado y se haya validado, así como una vez que se haya comprobado que las capacidades necesarias para ofrecer los servicios con la calidad requerida esté consolidada. En la visión a ocho años de Plan Estratégico del CEMIE-Eólico el tema de transferencia está considerado a partir del quinto año de vida del CEMIE-Eólico. Por supuesto, si las condiciones y oportunidades se llegan a dar antes se avanzará todo lo que sea posible. La promoción del proyecto y de sus resultados se hará a través del sitio Web del CEMIE-Eólico así como a través del sitio Web del CIDESI, esto además de la presentación del avance del proyecto en foros, congresos, publicaciones y demás oportunidades que surjan durante el desarrollo del proyecto.