



Jorge M. Huacuz Villamar

Energías renovables en el IIE, punto de apoyo para la transición energética de México

Energías renovables en el IIE,
punto de apoyo para la transición
energética de México

Edición: 2016

D.R. © Instituto de Investigaciones Eléctricas

Reforma 113, colonia Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México

Revisión, diagramación y cuidado de la edición: Departamento de Difusión

Fotografía: Archivo fotográfico del IIE

Diseño: Arturo Fragoso Malacara

Revisión del contenido: Ubaldo Miranda Miranda

Fotografía de portada: El Gavillero, Estado de Hidalgo, 1983

ISBN: 978-607-8182-07-7

Se imprimió en abril de 2016, en los talleres de Dicograf, S.A. de C.V. Av. Poder Legislativo 304, colonia Prados de Cuernavaca, C.P. 62239, Cuernavaca, Morelos, México

El tiraje consta de 100 ejemplares

Contenido

Colaboradores	5
Semblanza de Ana María Martínez Leal	7
Prólogo	8
Surgimiento, crecimiento y fortalecimiento de las energías renovables en el IIE	11
El contexto en la década de 1970	12
Los inicios (1977-1988)	19
La segunda etapa (1989-1999)	28
La etapa contemporánea (2000-2015)	40
Memorias de una fascinante y larga aventura	53
Conocer el recurso	54
Eólico	58
Solar	65
Biomasa	73
Minihidráulico	75
Energía del océano	83
Laboratorio Nacional para la Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables en México (LERM)	84
Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables (SIGER)	89
Biomasa	91
El biogás en el IIE	94
Biodigestores	94
Tratamiento de aguas	98
Del desarrollo a la promoción	101
De basura a energía	101
Incineración de basura	108
<i>Jatropha curcas</i>	109
De la promoción, de vuelta al desarrollo	112
Energía de nopales	112
Energía del bambú	115
Energía eólica	117
Los primeros pasos en el IIE	118
Pequeñas máquinas eólicas	119

Labores tempranas de promoción	123
Vientos de cambio	126
El Acuerdo eólico	127
El convenio con Oaxaca	128
El proyecto GEF	130
Sobre el Plan de Acción	131
Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE)	134
El proyecto MEM	137
CEMIE eólico	139
El proyecto AEM	141
Energía solar	143
Los primeros pasos	143
Tecnología termosolar a concentración	145
Tecnología fotovoltaica	148
Electrificación rural	150
Interconexión a red	153
El estanque solar	157
Minihidráulica	163
Sistemas híbridos	172
Hidrógeno y celdas de combustible	181
Antecedentes en el IIE	184
En busca de tecnología propia	185
Tecnología para prueba de celdas	187
El proceso inverso	188
Tecnologías de soporte	190
El primer prototipo	191
Baterías electroquímicas	192
Tecnología IIE para el transporte	193
Los vínculos creados	196
El recurso humano	199
Afrontando los retos de la reforma energética	207
Epílogo	208
Adiós IIE, bienvenido INEEL	210
Un vistazo al futuro	212

Colaboradores

Un agradecimiento a quienes aportaron sus conocimientos para la preparación de esta obra:

Jaime Agredano Díaz (energía solar fotovoltaica), José Luis Arvizu Fernández (biomasa), Marco Antonio Borja Díaz (energía eólica), Ulises Cano Castillo (hidrógeno y celdas de combustible), Flavio Ferrán Riquelme (minihidráulica), Raúl González Galarza (energía eólica y minihidráulica), Javier Lagunas Mendoza (estaciones hidroclimatológicas), Ubaldo Miranda Miranda (evaluación de recursos), Carlos Ramos Berumen (energía termosolar), Hipólito Romero Tehuitzil (biomasa) y Ricardo Saldaña Flores (evaluación de recursos), y a todos los investigadores de la GER-IIE cuyo trabajo quedó plasmado en esta historia.

Gerencia de Energías Renovables
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Cuernavaca, Morelos, México



Este libro ha sido elaborado con la intención de dejar un apunte sobre las aportaciones que hizo el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en el campo de las energías renovables durante sus 40 años de existencia. Evidencias de las actividades que aquí se reseñan se hallan contenidas en múltiples informes técnicos de la Gerencia de Energías Renovables (GER-IIE), en artículos del Boletín IIE y en otras publicaciones de divulgación y especializadas.

A la memoria de la Maestra Ana María Martínez Leal, jefa fundadora del Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía, actualmente Gerencia de Energías Renovables (1936 - 1995).



Semblanza de Ana María Martínez Leal

Ana María, o “la Maestra”, como cariñosamente se le nombraba, nació el 17 de diciembre de 1936. Ingresó al IIE el 19 de julio de 1976, época en la que se diseñaba el futuro y se definían las estructuras de este Instituto. Maestra en ciencias nucleares por la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional, realizó estancias de especialización en la *Atomic Energy of Canada*, la Universidad de Salford en Inglaterra, el Centro Nuclear de *Soreq* y la Comisión de Energía Atómica de Israel. A su ingreso al IIE primero se desempeñó como Jefa del Departamento de Combustibles Fósiles. En 1978 recibió la encomienda de conformar el Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía, ahora Gerencia de Energías Renovables, cuya jefatura ocupó hasta el día de su muerte. Reconocida nacional e internacionalmente como experta en el campo de la biomasa, sentó las bases para establecer en el país la tecnología de digestión anaerobia y llevó, junto con sus colaboradores, el conocimiento de este proceso desde su teoría fundamental hasta sus aplicaciones para producir electricidad en el medio rural. Firme creyente en el concepto de libertad con responsabilidad, su lema como Jefa del Departamento fue siempre dejar hacer y apoyar el trabajo bien hecho. Persona de altísima calidad humana, dedicaba parte de su tiempo libre a dar clases de matemáticas a un grupo de invidentes. Tenía un gusto particular por la música, tanto clásica como popular, y disfrutaba de tocar la flauta barroca. Murió en el desempeño de su encargo como Jefa del Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía el 4 de marzo de 1995.



Prólogo

Las energías renovables (eólica, solar, geotérmica, biomasa, hidroenergía y del océano) son consideradas como energías limpias, es decir, que no emiten cantidades significativas de gases de efecto invernadero y por lo cual son necesarias para transitar hacia economías de bajo carbón, condición para resolver la problemática del cambio climático. Todos los escenarios de largo plazo, tanto de entidades multinacionales, nacionales o privadas, muestran una participación importante de estas energías primarias para satisfacer la demanda energética requerida para un desarrollo sustentable mundial. Por esta razón, en años recientes las actividades comerciales, así como las de investigación y desarrollo tecnológico (I+DT) en estas energías, se han incrementado sustancialmente con la finalidad de satisfacer esa demanda al menor costo posible.

Desde el inicio de la operación del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en 1976 se abordaron actividades de I+DT en estas energías, debido al gran interés que en esa época mostró el personal de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). El fin era buscar formas de llevar electricidad a las comunidades rurales a menor costo del que se incurre al extender las redes de distribución, considerando que estas energías se podían encontrar *in situ*. En la gran mayoría de los casos, el proceso de electrificación rural no es rentable, ya que la demanda de esas comunidades es pequeña en comparación con la inversión a realizar, por lo que cualquier alternativa que pudiera llevar a reducir el costo era de interés investigar. El primer contrato que se firmó entre el IIE y la CFE fue en este tema.

A lo largo de los años se ha ido transformando el enfoque de la I+DT en energías renovables, en especial orientándola a cubrir no solo aplicaciones relacionadas con generación distribuida, como la electrificación rural, sino también la generación centralizada, la cual implica unidades de generación de mayor tamaño interconectadas a las redes de transmisión.





Hoy en día, la importancia de las energías renovables se ha incrementado dada la preocupación creciente de la sociedad mundial por la problemática del cambio climático. Estas fuentes de energía deberán de contribuir a satisfacer la demanda de energía, tanto eléctrica como térmica, en la proporción que sea física y económicamente factible.

Las actividades futuras de I+DT en el Instituto tendrán como cimiento el desarrollo de recursos humanos y de infraestructura que se logró en los últimos 40 años y que se relata en este libro, por lo cual, estoy seguro, el IIE habrá de tener importantes resultados que contribuirán al éxito en el cumplimiento de las metas que se impongan al sector eléctrico mexicano, considerando su proceso actual de transición hacia un mercado competitivo y en una economía de bajo carbón.

Pablo Mulás del Pozo

*“Primero te ignoran, luego se ríen de ti,
luego te atacan, y al final acabas venciendo”*

Gandhi



Surgimiento, crecimiento y fortalecimiento de las energías renovables en el IIE

El contexto en la década de 1970

Hoy en día el tema de la energía ocupa espacios importantes en los medios internacionales y nacionales: las noticias sobre las reservas y los precios de los hidrocarburos fluyen con rapidez; las conferencias y reuniones de expertos, inversionistas, académicos y políticos se suceden con frecuencia; existen organismos multilaterales y nacionales trabajando activamente en el tema, y se buscan afanosamente opciones para asegurar el suministro energético futuro de las naciones en el contexto de un desarrollo sustentable. En nuestro país, después de mucho debate, ya está en proceso de implementación una reforma energética y se cuenta con leyes para la transición energética, el aprovechamiento de las energías renovables, el uso eficiente de la energía, así como una estrategia nacional sobre el tema, acompañadas de leyes sobre el cambio climático que consideran a estas formas de energía como una de las opciones para su mitigación.

Pero el mundo no ha sido siempre así. Para mediados del tercer cuarto del siglo pasado poco se hablaba sobre el tema. La energía se consideraba como un bien dado, como el aire que respiramos o el agua que disfrutamos; era un elemento externo a la economía, abundante y seguro, que no ameritaba preocupación por parte de la sociedad. Se trataba de un insumo adecuadamente manejado por una pequeña élite mundial de especialistas. En México, los descubrimientos de grandes yacimientos petrolíferos nos auguraban un futuro sin sobresaltos en el tema energético, y ponían ante nosotros una gran oportunidad para el desarrollo económico y social.

A mediados de la década de 1970, factores geopolíticos cambiaron para siempre el escenario. Un grupo de países del Oriente Medio, poseedores de los mayores yacimientos petrolíferos hasta entonces conocidos, decidieron suspender sus envíos de este combustible a las principales naciones industrializadas, causando grandes estragos a sus economías y, al mismo tiempo, despertando al mundo de su largo letargo energético. Los países afectados reaccionaron rápido con diversas estrategias, tanto en lo individual como en lo colectivo. De particular relevancia fue la creación, en 1974, de la Agencia Internacional de la Energía, cuyo objetivo inicial fue coordinar las medidas que debían tomarse para asegurar el abastecimiento de petróleo a los Estados miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), particularmente en situaciones de emergencia, con el fin de sostener su crecimiento econó-



mico, y que actualmente se ocupa de aspectos relevantes de las políticas energéticas de esa colectividad, como la seguridad energética, el desarrollo económico y la protección del medio ambiente. Ese mismo año se creó en los Estados Unidos, la Administración para la Investigación y el Desarrollo de la Energía (ERDA por sus siglas en inglés), que tres años después se convertiría en el DOE (por sus siglas en inglés).

La política energética de nuestro país, cuya raíz se ubica en los Artículos 25, 26 y 27 de la Constitución –y cuya modificación ha sido objeto de airados debates en el contexto de la reciente y anteriores reformas– ha sido históricamente implementada a través de las dos grandes empresas nacionales, Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), creadas *ex profeso* para tales menesteres hace más de 70 años. No fue sino hasta 1994 que se constituyó un órgano específico en este sector, la Secretaría de Energía (SENER), con la responsabilidad específica de establecer las políticas, planes y programas nacionales en el tema energético. Anterior a ello, este tema era manejado como algo un tanto secundario, primero dentro de la Secretaría del Patrimonio Nacional (SEPANAL), la cual en 1976 habría de convertirse en la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial (SEPAFIN), y que seis años después se convertiría en la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP). De esta forma, petróleo y electricidad han sido los ejes centrales de la política energética del país. Y, hasta la fecha, el petróleo y otros combustibles fósiles como el gas natural y el carbón siguen siendo el recurso energético dominante en nuestra economía, con el 91.31% de la producción de energía primaria [SENER, Balance de Energía 2014]. Otros recursos energéticos como la energía nuclear y las energías renovables han sido utilizados solo en forma marginal, aunque estas últimas con tendencia creciente en los años recientes.

Fue en el contexto de ese marco energético nacional –legislativo e institucional– incipiente, y en medio de la efervescencia energética internacional, que a finales de 1975 se creó el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), siendo ésta la primera institución nacional en la historia del país con el mandato expreso de desarrollar las energías renovables, según se lee en su decreto de creación:

“CONSIDERANDO

Que en razón de que los recursos energéticos tradicionales son limitados, resulta urgente impulsar la investigación científica y tecnológica para el aprovechamiento en la generación de electricidad, de otras fuentes de energía, tales como la nuclear, la solar, la geotérmica, dentro del marco de una política nacional de energéticos,”

Diario Oficial de la Federación, lunes 1° de diciembre de 1975.

Fue 33 años después, en octubre de 2008, que el Congreso de la República aprobó por primera vez una ley para el fomento de las energías renovables: la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), de la cual han emanado reglamentos y leyes secundarias, programas especiales y lineamientos para el desarrollo local de tecnologías. Esta ley también asigna funciones y responsabilidades en torno a las energías renovables a varias entidades del sector público, crea el Consejo Consultivo de Energías Renovables, y ordena el establecimiento de un fideicomiso para financiar proyectos en el marco de la transición energética del país. Meses antes, en ese mismo año, el Congreso aprobó una ley para el desarrollo y promoción de los biocombustibles, y en noviembre de 2009, la SENER emitió un acuerdo con lineamientos para el negocio de los bioenergéticos en el país. Por su parte, la Comisión Reguladora de Energía (CRE), creada en 1993, construye a lo largo de los últimos diez años un marco regulador que ha facilitado la incorporación de las energías renovables, principalmente eólica y solar fotovoltaica, para la generación eléctrica. Otras entidades del sector público como la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), creada en 1999 como órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía, y convertida en 2008 en la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), y el Fideicomiso para el Ahorro de Electricidad (FIDE), creado en 1990, promueven el uso de las energías renovables a través de actividades de diversa índole. En el ámbito académico, instituciones como el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en sus campus Iztapalapa y Azcapotzalco, y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través del Centro de Investigación en Materiales, que dio origen al Laboratorio de Energía Solar, el cual



AERMOTOR

TEL. 800-441-6542



posteriormente se convirtió en el Centro de Investigaciones en Energía (CIE-UNAM) y en fecha reciente en el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) han sostenido por más de 30 años, líneas de investigación y desarrollo, en el tema de energías renovables.

¿Qué papel ha jugado en este devenir el IIE? ¿Cuáles han sido sus principales contribuciones al desarrollo de las energías renovables? ¿De qué forma ha cumplido el mandato establecido en su decreto de creación? Responder a éstas y otras preguntas pertinentes es el propósito del presente libro, que pretende a la vez dejar un testimonio del trabajo realizado por las varias generaciones de investigadores que han laborado en este tema en el Instituto a lo largo de los 40 años que han pasado desde su creación.

La función sustantiva del IIE a lo largo de su historia ha sido atender los requerimientos del sector eléctrico del país en lo relativo a la solución de problemas técnicos no comunes, a desarrollar e incorporar nuevas tecnologías, y a facilitar su tránsito hacia nuevas etapas en la evolución hacia los sistemas eléctricos del futuro. En su ámbito de acción, el Instituto brinda apoyo técnico tanto a la SENER como a otras entidades del sector público, incluyendo a la CFE, la CRE, la CONUEE, el FIDE, y PEMEX, así como a gobiernos estatales y municipales, y a empresas y organismos del sector privado. Promover y apoyar la innovación tecnológica ha sido parte de su lema principal, el cual refleja la naturaleza de su quehacer en el campo de la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico.

Tradicionalmente, las energías renovables no convencionales han tenido una participación relativamente modesta en el sistema eléctrico nacional, tanto en capacidad instalada como en generación de electricidad. Los recursos energéticos renovables preferidos han sido el potencial hidroeléctrico de gran tamaño, en centrales como Chicoasén, Malpaso, Aguamilpa y otras, y los recursos geotérmicos hidrotermales de alta temperatura, como los yacimientos de Cerro Prieto y Los Azufres. En fechas más recientes, la energía eólica ha venido ganando terreno, al punto que en este momento su capacidad instalada es más del triple de la geotérmica y mayor que la nuclear. La solar fotovoltaica ha tenido un despegue espectacular tal, que ya se construyen en el país plantas de varias decenas de megawatts (MW). Sin embargo, conforme crece la capacidad total del sistema al paso de los años, la contribución porcentual de estas

fuentes parece disminuir. Otros recursos abundantes en el país, como la solar térmica, la biomasa, la geotermia de mediana y baja temperatura, el pequeño potencial hidroeléctrico, y la energía del mar, no han sido utilizados hasta ahora en una escala significativa, por una diversidad de factores cuyo análisis queda fuera de los objetivos de este libro.

Los inicios (1977-1988)

Desde su creación, el IIE ha jugado un papel importante en el campo de las energías renovables, constancia de lo cual se esboza en este volumen. Tomando en cuenta la poca infraestructura humana y técnica de soporte que en este tema existía a mediados de la década de 1970 en México y en el mundo, y atendiendo al mandato establecido en su decreto de creación, en el Instituto se conformó el departamento de Fuentes No Convencionales de Energía en el año 1978.

La característica distintiva de este departamento en los primeros diez años de vida del IIE fue la creación de capacidades: recursos humanos, laboratorios y otra infraestructura de soporte. Con este fin se establecieron mecanismos para la atracción de talentos que por aquellos tiempos recién se habían formado a nivel posgrado en el país y en el extranjero, y mediante el programa de becarios del propio Instituto se capacitaban grupos de jóvenes estudiantes que posteriormente habrían de incorporarse como investigadores en las distintas áreas del departamento, y que al paso de los años se convertirían en expertos de reconocida capacidad.



A la vez, se construyeron laboratorios y se definieron líneas de investigación y desarrollo tecnológico que desde entonces han venido adecuándose a los requerimientos del sector eléctrico y al cambio tecnológico de la época, pero manteniendo siempre el rumbo hacia un cambio de base energética en el país.



El Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía (posteriormente denominado Gerencia de Energías No Convencionales y en la actualidad Gerencia de Energías Renovables) inició sus labores en las áreas de energía eólica, biomasa, y energía solar fotovoltaica y térmica. Los primeros trabajos se centraron en temas relacionados con el ámbito rural, e incluyeron el desarrollo de pequeños aerogeneradores, máquinas eólicas para bombear agua y producir potencia mecánica, cocinas solares y calentadores solares de agua. De particular relevancia son los trabajos pioneros que entonces se realizaron sobre el proceso de digestión anaerobia de excretas animales, y el subsiguiente desarrollo de biodigestores, equipos que se utilizan para la producción de biogás a partir de materia orgánica, con los cuales se realizaron proyectos piloto para la generación de electricidad a partir de este combustible. También se desarrollaron turbinas y ruedas hidráulicas para el aprovechamiento de pequeñas corrientes y caídas de agua. Estos trabajos, pioneros en el país, se enmarcaron en el contexto de un concepto más amplio denominado “sistemas energéticos integrados”, que buscaba crear un modelo alternativo para la dotación de energía a comunidades rurales sin acceso a energéticos comerciales. Fueron en buena parte patrocinados por la Unidad de Electrificación Rural de la CFE, en el marco de lo que fue el primer contrato con financiamiento externo realizado por el IIE en su historia. Todavía se dependía a ciento por ciento del presupuesto federal para la operación.

En la segunda mitad de la década de 1970 y principios de los ochenta, todavía resonaba en el mundo el eco de las conclusiones de la primera conferencia sobre energías renovables realizada por las Naciones Unidas en Roma, Italia, diez años antes: las energías renovables estaban destinadas a resolver el problema de suministro energético de más del treinta por ciento de la humanidad, ubicada principalmente en las zonas rurales de los países menos desarrollados. Aún se sentía la influencia del movimiento de la “tecnología apropiada” y de la filosofía de “lo pequeño



Prototipo de aerobomba desarrollado conjuntamente por Volunteers in Technical Assistance (VITA) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas

es hermoso”, sin embargo, en las naciones industrializadas se gestaba ya un movimiento para llevar a otros niveles la tecnología para el aprovechamiento de las energías renovables. Los desarrollos mundiales en las ramas eólica, fotovoltaica y de concentración solar avanzaban con rapidez hacia el ámbito de la producción industrial. En países nórdicos la biomasa recuperaba los espacios que en épocas anteriores había tenido para la calefacción de hogares, e inclusive se ubicaba como una opción viable para la generación eléctrica a nivel municipal. También empezaban a darse los primeros proyectos piloto-demostrativos de gran escala, principalmente en California, Estados Unidos, donde se instalaron las primeras grandes centrales termosolares para la producción de electricidad, en la localidad de Barstow, la primera planta fotovoltaica en Carrisa Plains, y las primeras granjas eólicas en Altamont Pass, Palm Springs y otras localidades cercanas, todo ello auspiciado por la ley PURPA (*Public Utility Regulatory Policy Act*), también pionera en el mundo como marco jurídico para incentivar el uso de las energías renovables.



Mientras tanto en México, los gobiernos en turno establecían sendos convenios de cooperación para realizar proyectos demostrativos, primero con el gobierno francés para un programa de instalación de equipos solares de bombeo de agua que llevó el nombre de *Tonatiuh* y después con el gobierno alemán en el llamado proyecto *Sontlan* que incluyó instalaciones a plena escala precomercial para la desalación de agua de mar, aire acondicionado para la climatización de edificios multifamiliares, y un pueblo de pescadores en Baja California Sur dotado, a partir de la energía solar, con energía para todos los servicios comunitarios y para el procesamiento

o y la preservación de sus productos, instalaciones que recorrían el velo hacia el futuro energético de comunidades remotas.

Al contrario de lo que ocurría en los Estados Unidos y en varios países europeos, notablemente Alemania y España, las tradicionales limitaciones presupuestales para la investigación y el desarrollo tecnológico en México, la entonces baja rentabilidad económica de las tecnologías para generación eléctrica con energías renovables, y la carencia de una política para dar impulso al desarrollo nacional en este campo, hacían poco viable en aquella época, la idea de instalar en nuestro país grandes proyectos de generación eléctrica que permitieran demostrar a plena escala la via-

bilidad de las tecnologías, así como obtener información y experiencia sobre sus requerimientos de operación, mantenimiento y costos. En consecuencia, la actividad del Instituto en estos temas se enfocó en dar seguimiento a los desarrollos mundiales, principalmente de las tecnologías termosolar a concentración y fotovoltaica, a fin de asimilar el conocimiento que se empezaba a generar en otras partes del mundo. Con tal fin se establecieron convenios con instituciones avanzadas en el tema, tales como el *Electric Power Research Institute* (EPRI), los Laboratorios Sandía y el actual *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, antes *Solar Energy Research Institute*, SERI), en los Estados Unidos; en España, con la Asociación de Industrias Eléctricas (ASINEL) y la Plataforma Solar de Almería, y en Alemania, con la Agencia Espacial (DLR por sus siglas en alemán). Estos convenios permitieron la participación de investigadores del IIE en proyectos internacionales de gran alcance, y ayudaron a la consolidación de los cuadros de jóvenes especialistas nacionales, quienes adquirieron un conocimiento profundo de las tecnologías, así como de los métodos y estrategias seguidos en aquellos países para su desarrollo e introducción al mercado.

La creación de capacidades locales dio paso al desarrollo de algunas tecnologías propias. Se diseñaron y construyeron prototipos de pequeñas turbinas eólicas de hasta 10 kW de capacidad, turbinas hidráulicas para mini-centrales hidroeléctricas de 100 kW de potencia, biodigestores de tamaño comunitario y sistemas para generación de electricidad con el biogás en ellos producido. Al mismo tiempo se trabajó en la tecnología de estanques solares (concepto que utiliza agua y sales comunes

para captar grandes cantidades de energía solar) la cual se desarrolló en el Instituto, en colaboración con universidades y centros de investigación de otros países, desde sus fundamentos teóricos, hasta la construcción de una instalación piloto de plena escala para producir 15 kW eléctricos en forma continua, que se ubicó en la unidad de almacenamiento de crudo de PEMEX ubicada en la población de Tuzandepetl, Veracruz. Y fue el IIE quien, en 1987, organizó la primera conferencia internacional sobre esta tecnología, que habría de continuar con eventos anuales similares organizados por instituciones de otros países, pero que más adelante perdió impulso, tal vez debido a lo complejo, o casi misterioso, del funcionamiento de esta tecnología.





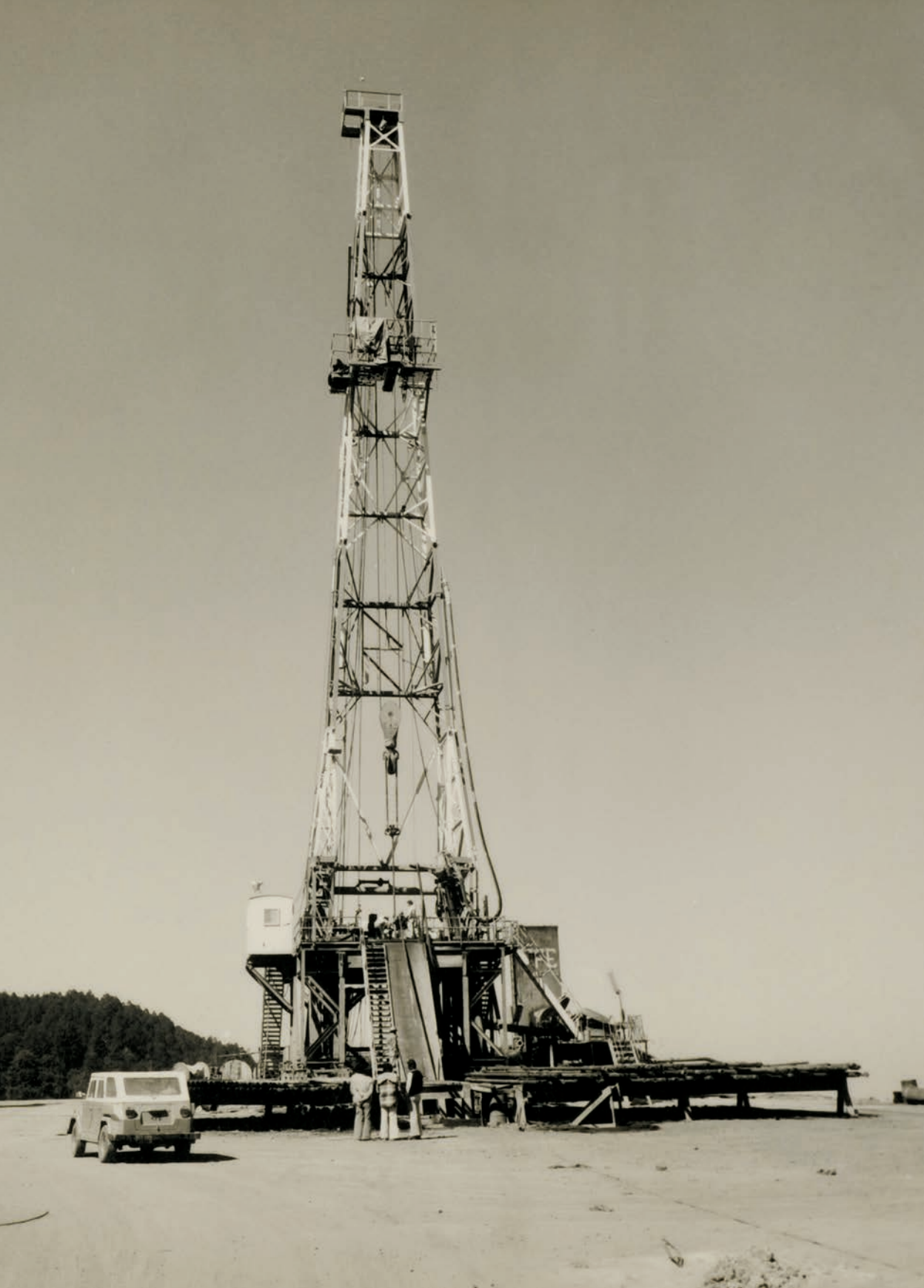
A mediados de la década de 1980, la crisis económica del país obligó al Instituto a buscar recursos económicos adicionales al presupuesto federal para financiar su operación. Los trabajos de las distintas áreas se orientaron con mayor fuerza a la prestación de servicios mediante contratos para atender los requerimientos del mercado. La tarea no fue fácil en el campo de las energías renovables, donde las tecnologías en el mundo todavía no alcanzaban un grado de madurez comercial, y menos en un país como México, donde la abundancia de petróleo y los bajos precios de los combustibles derivados hacían aún más difícil su aplicación. Sin embargo, había nichos de oportunidad para la aplicación del talento existente en el IIE, uno de los cuales estaba en la necesidad de crear conocimiento sobre la abundancia y características de los recursos energéticos renovables del país, lo que apuntaba la necesidad de desarrollar infraestructura para la evaluación y caracterización de los recursos energéticos renovables en sitios de interés. Ante esta necesidad, el Instituto decidió destinar algunos recursos para tal fin y para consolidar esfuerzos puntuales que previamente se habían iniciado, particularmente en el área de energía eólica. Pero habrían de pasar más de 20 años para que esta necesidad fuera oficialmente reconocida, y se estableciera por ley la obligación de crear y mantener actualizado un inventario nacional de los recursos energéticos renovables del país.

A finales de esa misma década, el gobierno mexicano emprendió acciones sin precedente para dotar de servicio eléctrico a un gran número de comunidades rurales en zonas remotas a lo largo y ancho del país. Esto, en buena medida, como una reacción a las demandas de los movimientos

indígenas, cuyo foco principal tuvo lugar en los altos del sureño Estado de Chiapas. Los programas incluyeron el uso de las energías solar, microhidráulica y eólica, así como combinaciones de éstas en los llamados **sistemas híbridos**, a la par de las extensiones de la red eléctrica donde resultaba viable. El reto era grande, pues no había entonces modelos que se pudieran seguir. Organismos como el Banco Mundial y las entidades de cooperación bilateral y multilateral, dedicaban cuantiosos recursos para desarrollar proyectos piloto en otras partes del mundo con el fin de encontrar las mejores prácticas que pudieran facilitar la implantación masiva y sustentable de estas tecnologías en un medio sociocultural y tecnológicamente empobrecido en los países en desarrollo. Mediante convenios con la Unidad de Electrificación Rural de la CFE, el IIE se dio a la tarea de desarrollar elementos técnicos necesarios para asegurar la correcta aplicación de las tecnologías, incluyendo métodos de diseño y selección de tecnologías, especificaciones técnicas, y esquemas para el aseguramiento de la calidad de los proyectos. Estos elementos fueron aplicados por primera vez en los proyectos para electrificación de los nuevos asentamientos ocupados por las comunidades Cora-Huichol de la región del Nayar en el Estado de Nayarit, que fueron reubicados de sus asentamientos originales por requerimientos de la construcción de la central hidroeléctrica de Aguamilpa. Quince años después, la mayoría de los equipos instalados todavía estaban cumpliendo su función.

Por un período cercano a los diez años, y a instancias de la propia CFE, el Instituto actuó como soporte técnico de aquellos programas de electrificación rural, desarrollando protocolos de prueba y evaluando en el laboratorio las tecnologías que habrían de instalarse en campo, y capacitando a personal tanto de la CFE como de otras entidades, incluyendo funcionarios de los gobiernos de estados y municipios donde se aplicaron los programas, así como del entonces Instituto Nacional Indigenista (INI), posteriormente transformado en la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI). La evaluación en campo de los sistemas y equipos instalados era entonces una inquietud latente, dado lo novedoso del esquema: investigadores del IIE recorrieron cientos y cientos de kilómetros en avión, en vehículos terrestres y a pie para evaluar el desempeño de las instalaciones, aplicando técnicas previamente desarrolladas por ellos mismos.





La experiencia ganada con estas actividades ubicó al grupo de investigadores en energías renovables del Instituto a la cabeza de aquéllos que en el mundo trabajaban en proyectos de electrificación rural con estas tecnologías. Por ello, las capacidades del IIE sobre el tema fueron requeridas en múltiples ocasiones por organismos internacionales y bilaterales de ayuda para el desarrollo, para capacitar mediante conferencias, talleres y seminarios, a personal de instituciones en otras partes del mundo. Y por la misma razón, durante casi ocho años, un investigador de la GER-IIE fungió como coordinador de la Red Iberoamericana de Electrificación Rural con Energías Renovables (RIER) del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). La experiencia vivida también puso en evidencia la complejidad de los llamados **sistemas híbridos**, tanto en sus aspectos de diseño como en los de su aplicación para la electrificación de comunidades rurales, por lo que se juzgó conveniente establecer una nueva línea de investigación y desarrollo tecnológico sobre este tema en el Instituto. En el año de 1995, el IIE organizó el primer taller internacional sobre sistemas híbridos fotovoltaico-eólico, al que asistieron delegados de las principales instituciones de investigación y desarrollo que trabajaban en este tema en otros países.

Cinco años después de la creación del Instituto, en 1980, se constituyó formalmente la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), gracias a la iniciativa de un grupo de investigadores y académicos de varias instituciones, entre los cuales destacó la participación activa de personal de la hoy Gerencia de Energías Renovables del IIE. A lo largo de su existencia, este órgano de la sociedad civil ha contado con el apoyo del Instituto, no solamente en cuanto a su participación activa en congresos sino también como instructores de los cursos temáticos que la ANES ofrece, y sirviendo en varios Consejos Directivos como representantes electos en puestos como los de secretario general y presidente nacional. Resulta anecdótico que al celebrar sus 40 años de existencia el IIE tiene como Director Ejecutivo a quien fuera el primer presidente nacional de la ANES: José Luis Fernández Zayas.



La segunda etapa (1989-1999)

La entrada de México a la OCDE en la primera mitad de la década de 1990 constituyó un hito con múltiples efectos en la economía nacional, incluyendo el ámbito de la investigación y el desarrollo científico y tecnológico. Las energías renovables no fueron la excepción, pues en esa instancia se abrieron oportunidades para un mayor acceso a fuentes primarias de información sobre los programas y las actividades existentes en los países industrializados para el desarrollo de estas formas de energía. Así, por mediación de la SENER, se formalizó la participación del Instituto en varios de los instrumentos con que cuenta la Agencia Internacional de la Energía (AIE) para la cooperación entre los países miembros en el campo de la energía, conocidos como Acuerdos de Implementación. En estos Acuerdos se abordan temas especializados sobre estrategias, políticas, investigación científica y desarrollo tecnológico que han sido propicios para que el IIE, aun sin ser miembro de la AIE, se incorpore a importantes redes de instituciones y especialistas en el campo de las energías renovables y otras tecnologías.

A partir de los resultados de un análisis realizado sobre las tendencias tecnológicas en el mundo y de los mecanismos implementados en varios países para su pronta incorporación al mercado de las energías renovables, la Gerencia de Energías Renovables del IIE (GER-IIE) elaboró una propuesta de estrategia para el desarrollo de las energías renovables en México, la cual fue sometida a consideración de la SENER, lo que



dio origen al establecimiento de un Plan Piloto para el Desarrollo de las Energías Renovables.

Este Plan Piloto, implementado a partir de 1999, tuvo como objetivos globales contribuir al establecimiento de una política nacional de energía sustentable, identificar las barreras para la implantación de las energías renovables en México, crear elementos para eliminar tales barreras y facilitar la implantación masiva de las tecnologías correspondientes, así como catalizar el desarrollo industrial nacional de las tecnologías de energías renovables. Con la ejecución del Plan se buscaba el dominio de la tecnología mediante desarrollos locales y transferencia tecnológica. Además, se procuraba establecer un marco de normas y especificaciones técnicas para la calidad de las tecnologías y de los proyectos, así como coadyuvar en la formación de recursos humanos calificados para apoyar el desarrollo industrial y el establecimiento de nuevas empresas de ingeniería y servicios en este campo. Por otro lado se buscaba identificar y probar mecanismos institucionales y de financiamiento que facilitaran la penetración de estas fuentes de energía en el mercado energético nacional.



La estrategia implementada para el logro de los objetivos del Plan estaba orientada hacia la vinculación del Instituto con industrias nacionales interesadas en participar en el desarrollo de las fuentes renovables de energía y facilitar el proceso de transferencia tecnológica desde las etapas tempranas de su desarrollo. También buscaba la vinculación con el sector académico, con miras a lograr importantes beneficios mutuos, tales como la formación de recursos humanos de alto nivel, el uso de herramientas teóricas avanzadas en la solución de problemas específicos, y un mejor entendimiento de los requerimientos del desarrollo tecnológico. Para financiar los proyectos se buscó la aportación de fondos concurrentes de varias fuentes, incluyendo los organismos internacionales que recién habían sido creados con el propósito de fomentar el desarrollo de energías con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.



La ejecución del Plan no fue fácil ni inmediata y sus resultados fueron poco satisfactorios. La falta de financiamiento, que suele acompañar a las



recurrentes crisis económicas del país, fue una constante a lo largo de los años en que se intentó llevar a cabo los proyectos que se establecieron en el programa de trabajo, Sin embargo, contando ya con una masa crítica de especialistas, y con las experiencias de iniciativas previamente planteadas, o ejecutadas, se emprendieron proyectos en varias áreas, los cuales sirvieron como base de las actuales líneas de trabajo de la GER-IIE.

Las actividades pioneras para la evaluación de los recursos energéticos renovables del país, que desde años anteriores se habían venido ejecutando, aunque de manera aislada y discontinua, se consolidaron en la línea del **Mapeo de recursos y sistema de información geográfica**, cuyo objetivo fue contar con un mecanismo para el manejo oportuno y ordenado de información sobre los recursos y las tecnologías de energías renovables, con fines de planeación y promoción de sus aplicaciones. Para lograr este objetivo se emprendió un proyecto para crear el Sistema de Información Geográfica sobre Energías Renovables, mejor conocido como SIGER. Este sistema, concebido como una herramienta para la planeación y apoyo a la toma de decisiones, habría de convertirse con el paso de los años, en una plataforma importante para el inventario nacional de estos recursos energéticos.

El desarrollo del SIGER se inició en el contexto de los programas de electrificación rural. Se buscaba entonces ubicar mediante técnicas cartográficas las comunidades sin acceso a la red eléctrica, a fin de facilitar



la planeación y la logística para la implementación de los proyectos. Sin embargo, al establecerse la política del nuevo federalismo, en la cual el presupuesto federal para obras de electrificación fue en lo sucesivo asignado directamente a los municipios en lugar de ejercerlo a través de la CFE, las actividades del IIE en apoyo a tales programas declinó por falta de recursos y, en consecuencia, también declinaron las actividades para el desarrollo del SIGER. Posteriormente la CONAE (hoy CONUEE) otorgó al Instituto un apoyo económico para que se continuara con el desarrollo. De ahí en adelante el proyecto del SIGER se mantuvo como un proyecto de infraestructura del propio IIE, hasta el momento actual en que se integra con otras actividades relacionadas.



El interés por desarrollar medios para aprovechar la energía solar, abundante en el país, ha estado presente por años en varias instituciones nacionales. Cada una ha emprendido desarrollos de acuerdo a su vocación y a los medios a su alcance. Así, en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) era ya una tradición la investigación y el desarrollo de celdas fotovoltaicas, incluyendo los procesos para su fabricación y ensamble en pequeños módulos generadores de electricidad para aplicaciones tales como alumbrado y telecomunicación en sitios remotos de difícil acceso. En el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM), por su parte, los investigadores trabajaban en la primera instalación piloto para la generación eléctrica con concentradores solares de canal parabólica, conocidos también como cilindro-parabólicos. Mientras tanto, en el Laboratorio de Energía Solar de la UNAM (LES-UNAM), que en la actualidad se conoce como Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), se desarrollaban investigaciones sobre materiales para aplicaciones fotovoltaicas y sobre dispositivos para producir frío con la energía del sol. El Instituto, por su parte, optó por tres líneas de desarrollo en energía solar como parte del Plan: **sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, concentradores solares de canal parabólica, y concentradores solares de plato parabólico.**

Tanto en el ámbito internacional como en el país, la noción de que los generadores fotovoltaicos estaban destinados a pequeñas aplicaciones, principalmente en el medio rural, estaba muy difundida a principios de la década de 1990. Poca gente imaginaba lo que habría de ocurrir unos años

después con la introducción del modelo de interconexión a la red eléctrica, que se originó principalmente en Alemania y se difundió rápidamente en los países europeos, migrando posteriormente a otras partes del mundo. Siguiendo este modelo, en 1997 el IIE inició los trabajos sobre sistemas fotovoltaicos conectados a red, con el objetivo de determinar en forma práctica, el impacto que éstos podrían tener para suavizar los picos de demanda eléctrica en regiones con fuertes requerimientos de aire acondicionado para la vivienda, como es el caso, principalmente, en el noroeste del país. Los trabajos iniciaron con la habilitación de un primer sistema que alimentaba electricidad a uno de los circuitos del edificio que todavía aloja a la Dirección Ejecutiva del Instituto en sus instalaciones principales de Cuernavaca, Morelos. A la vez se emprendió el desarrollo de otros elementos, técnicos y no técnicos, necesarios para la diseminación masiva de la tecnología. Los pequeños sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica son ya una realidad comercial en este país, en buena medida gracias a los trabajos pioneros del IIE. Hay miles de usuarios de electricidad que ya cuentan con un sistema fotovoltaico para autoabastecerse de electricidad en el esquema de **medición neta** impulsado por la GER-IIE.

La tecnología de canales parabólicas tomó un gran impulso desde la década de 1980, con la instalación de las primeras centrales termosolares





en California, Estados Unidos. A su vez, la planta piloto del II-UNAM marcó la pauta de lo que podía hacerse en el país, sin embargo, no se observaban tendencias claras en cuanto a la disposición de la CFE de adoptar estas tecnologías para generación eléctrica en gran escala. Por otro lado, no había evidencia de que alguna institución nacional estuviera atendiendo el tema de suministro de calor por medio de la energía solar para procesos productivos, esto a pesar de que más de la mitad de la energía que utilizan las industrias de proceso en el país es en forma de calor a temperaturas por debajo de los 200 grados Celsius, que en buena medida se abastece con el uso de gas natural o gas LP, combustibles de los que el país es deficitario. Con miras a aprovechar la oportunidad que ofrece este mercado, el Instituto emprendió un proyecto dentro del Plan Piloto para desarrollar tecnología termosolar de canal parabólica para el suministro de calor para procesos productivos. Como resultado de los trabajos se construyeron los primeros módulos de concentradores solares y se llevaron a cabo algunas instalaciones piloto que han servido para afinar la tecnología.

Los concentradores solares de plato parabólico no han tenido el auge que se esperaba en el mundo cuando inició su desarrollo. Un buen número de factores técnicos y de otra índole, principalmente por el lado del mercado, han hecho que el avance de esta tecnología se haya rezagado, al punto que algunas de las empresas pioneras en este desarrollo hayan decidido abandonarlo. Aun así, la tecnología ofrece ventajas significativas sobre otras opciones para la generación eléctrica con energía solar. Entre otras, esta tecnología es la que ha logrado eficiencias más altas en la conversión de luz solar a electricidad, y tiene la ventaja adicional de poder aplicarse en pequeña escala o en grandes instalaciones, por lo que en varios grupos de



investigación alrededor del mundo, incluyendo el IIE, se sigue trabajando en su desarrollo. El objetivo que para ello se fijó en el Plan Piloto fue asimilar la tecnología en su etapa precomercial para obtener conocimiento práctico y participar en su posterior desarrollo industrial. Los trabajos se iniciaron con un diseño conceptual, que fue en su momento traducido a un diseño ingenieril. Nuevamente la falta de recurso económico retrasó por varios años la construcción del aparato. Mientras tanto se realizaron gestiones para traer al país las máquinas que permitirían generar electricidad con la radiación solar concentrada, se probaron materiales para varios elementos del concentrador parabólico, y se realizaron estudios tratando de identificar los nichos de aplicación de la tecnología que se encuentre en producción industrial.



La biomasa es un recurso abundante y muy diverso en el país. Se incluyen aquí los desechos agrícolas y pecuarios, los residuos de la actividad de explotación maderera de los bosques, la leña, los residuos sólidos urbanos, las plantaciones de especies vegetales de alto rendimiento, y otras formas de materia orgánica susceptibles de ser aprovechadas como fuente de energía. En sus inicios, la GER-IIE puso sus esfuerzos en la tecnología de biogás producido a partir de estiércoles.

Con el conocimiento desarrollado se abordaron los ensayos para producción de biogás a partir de desechos orgánicos de los mercados municipales, así como de desechos de la industria vitivinícola (conocidos como vinazas) que tienen la característica de ser altamente contaminantes si se descargan en cuerpos de agua. Al establecerse el Plan Piloto se tenía como objetivo la construcción de una planta demostrativa de generación eléctrica para operar con biogás en una ciudad de tamaño medio y por cuestiones prácticas se había decidido utilizar el biogás que se produce en forma natural en los rellenos sanitarios que confinan desechos sólidos municipales. Sin embargo, esta idea tuvo que esperar muchos años para materializarse, dado un intrincado conjunto de problemas que presenta el marco legal e institucional de los municipios.



La basura constituye uno de los problemas más serios que enfrentan las autoridades municipales, tanto en lo que se refiere a los costos de recolección y disposición, como en cuestiones de imagen, riesgos para la salud

pública y deterioro del medio ambiente. En México han sido tradicionalmente pocos los desechos que se confinan apropiadamente y, donde se ha tenido esta práctica, ha sido solamente con propósitos de disposición final. En la década de 1990 la generación eléctrica con biogás de rellenos sanitarios era una idea un tanto exótica. Por ello el Instituto, con apoyo de la CFE y de la extinta compañía de Luz y Fuerza del Centro, se dio a la tarea de instalar lo que fue la primera planta piloto-demostrativa en el país. A pesar del éxito técnico de este pequeño proyecto, no fue posible replicar la experiencia a mayor escala de acuerdo con el objetivo del Plan: elementos de índole institucional, política, financiera, y de otros tipos, aún hoy día hacen muy difícil la ejecución de proyectos de esta naturaleza en el ámbito municipal, sin embargo, en algunos casos, notablemente en el municipio de Aguascalientes, sí fue posible elaborar los estudios que llevaron a la viabilidad de un proyecto actualmente ya en operación. Fueron cerca de doce municipios de tamaño medio y grande donde se promovió, es justo decir que sin mucho éxito, la adopción de esta tecnología.



El Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE), construido por el Instituto en la región del Istmo de Tehuantepec en el Estado de Oaxaca, es un ejemplo palpable de la materialización de ideas y planes concebidos un buen número de años atrás. En el tema de la energía eólica del Plan Piloto se estableció como objetivo desarrollar los elementos necesarios para promover la explotación del potencial eoloelectrónico identificado en la región de La Ventosa, Oaxaca, entonces estimado en más de



2,000 MW. Con tal propósito se estableció la meta de construir una plataforma para evaluar y asimilar la tecnología de aerogeneradores. Desde entonces se planteó que la instalación tendría una capacidad eléctrica aproximada de 4 MW, con máquinas de distintos fabricantes, incorporando lo más avanzado de la tecnología del momento. El propósito de esta instalación fue desde un principio adquirir conocimiento a fondo sobre las diversas tecnologías eoloeléctricas, tener medios para realizar pruebas de componentes de fabricación nacional, contar con la capacidad para evaluar el grado de madurez de las distintas tecnologías que existen en el mercado, y facilitar el desarrollo de empresas nacionales para operación y mantenimiento de centrales eólicas. A la fecha, en el CERTe opera un prototipo de turbina eólica de 300 kW, de origen japonés, y se proyectan otras instalaciones.



La etapa contemporánea (2000-2015)

El IIE recibió el nuevo siglo un mes después de la celebración de su 25 aniversario. En el entorno institucional, jurídico y económico se empezaron a observar señales de cambio favorables para el aprovechamiento de las energías renovables. Los programas gubernamentales para el fomento de los mercados de las distintas tecnologías para el aprovechamiento de estas fuentes de energía se replicaron con rapidez de un país a otro, y las estadísticas de los resultados cambiaron rápidamente su trazo lineal a una curva de perfil ascendente muy pronunciada. En el ámbito legislativo de México las discusiones sobre el tema tomaron mayor importancia y se empezaron a gestar nuevas leyes para fomentar las energías renovables. El ente regulador emitió resoluciones que poco a poco fueron conformando un panorama alentador para quienes desarrollaron y promovieron proyectos en este contexto, aunque todavía restringido por los lineamientos que marcaba la Ley que entonces regía el servicio público de electricidad, y por el marginal interés de las empresas eléctricas. En algún momento de la primera década de este siglo XXI, y después de mucho debate, la Cámara de Diputados aprobó una iniciativa conocida como LAFRE (Ley para el Fomento de las Energías Renovables), sin embargo, ésta no fue aprobada por los Senadores. Casi al mismo tiempo, en el Senado se introdujo la iniciativa para la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México, aprobada y emitida en febrero de 2008. Con un enfoque casi exclusivo en el bioetanol y el biodiésel, la emisión de esta Ley tuvo un efecto inmediato en la economía nacional, al provocar una escasez artificial de maíz, base de la alimentación de la población mexicana, pues algunos productores e intermediarios consideraron que la venta de este cereal sería más rentable como base para la producción de biocombustibles que como insumo para alimentos. Este fenómeno no ha sido privativo de México, pues alrededor del mundo todavía se debate el dilema de producir energía o alimento como principal vocación del campo.

Es también en esta primera década del siglo XXI que empezaron a darse los primeros proyectos eólicos de gran escala para generar electricidad: centrales de 20, 50 y 100 o más MW, y se emprendieron aplicaciones comerciales o semicomerciales de otras fuentes de energía renovable para producir electricidad. Y en la segunda mitad de esa década se aprobaron las leyes para el aprovechamiento sustentable de la energía y para el aprovechamiento de las energías renovables, y el financiamiento de

la transición energética (ambas en noviembre de 2008), así como sus respectivos reglamentos y programas y, por primera vez en la historia del país, se elaboró una Estrategia Nacional de Energía (ENE). El escenario cambió de manera importante con respecto a las décadas anteriores y, en consecuencia, los retos para el Instituto adquirieron nuevas dimensiones.

En el año 2000, el grupo de investigaciones sobre energías renovables del IIE era ya un grupo maduro y experimentado. A lo largo de esta década se empezaron a tener logros significativos en las áreas de actividad emprendidas en años anteriores. Es en esta década que también se establece una nueva línea de investigación en el tema de hidrógeno y celdas de combustible. Las actividades en este campo comenzaron por iniciativa de un pequeño grupo de investigadores de la entonces Gerencia de Materiales y Procesos Químicos del Instituto, quienes como resultado de una reestructuración institucional pasaron a formar parte de la GER-IIE, donde se constituyó formalmente esta área de investigación. Los primeros retos fueron formar una masa crítica de investigadores especializados en el tema y crear la necesaria infraestructura de laboratorios. Así, se recurrió a formar a nivel posgrado en el extranjero, a investigadores del IIE y a repatriar, con apoyo de CONACYT, a estudiantes mexicanos que recién habían concluido sus estudios de posgrado sobre el tema en universidades de otros países. Con el paso del tiempo y el avance de las actividades, dentro del grupo también se fueron formando otros recursos humanos en los niveles de maestría y doctorado. Algunos de ellos hoy





en día forman parte del equipo de trabajo en celdas de combustible del Instituto, al igual como ocurrió en el pasado en las otras áreas de las energías renovables.

El primer objetivo que el grupo se planteó fue el desarrollo de un pequeño sistema para producir hidrógeno por electrólisis del agua, y de una celda de combustible de 1 kW de potencia, actividades enmarcadas en un proyecto de desarrollo tecnológico para el mediano plazo, que buscaba la asimilación temprana de tecnologías que se anticipaba estarían en el menú de opciones para generación eléctrica en los próximos años. Los avances han sido significativos, pues se ha logrado obtener el dominio de la tecnología con desarrollos propios de los diversos elementos que la constituyen. Y, al igual que en el caso del papel que el IIE tuvo en la formación de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), el grupo de celdas de combustible fue factor importante para la formación de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno (SMH), de la cual un investigador de la GER-IIE fue el segundo presidente nacional.

Lo que en la década anterior fueron esfuerzos modestos y casi unilaterales para avanzar en el tema de la **evaluación y mapeo de los recursos energéticos renovables del país**, cobró auge con una propuesta del Instituto aprobada por el CONACYT para la creación del Laboratorio Nacional para la Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables en México (LERM). Este proyecto multianual se inició con financiamiento concurrente del CONACYT y del FICYDET, un fideicomiso creado por el Instituto para impulsar nuevos desarrollos. Los fondos obtenidos



sirvieron para adquirir instrumentos y equipos de medición, y también para congregar dentro de esta iniciativa a un conjunto de instituciones a lo largo y ancho del país. Este proyecto ha servido de base para sustentar las actividades actuales relativas al levantamiento del inventario nacional de los recursos energéticos renovables del país, según lo establece la propia Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables.

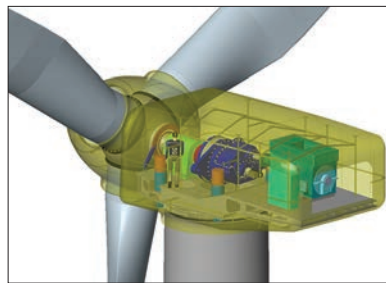


El Mecanismo de Desarrollo Limpio (más conocido como MDL), instrumento internacional creado para incentivar en términos económicos el desarrollo de proyectos que eviten las emisiones de gases con efectos de invernadero (metano y bióxido de carbono entre los principales) llegó a México con gran intensidad en esta década, luego de que nuestro país fuera una de las primeras naciones en ratificar el Protocolo de Kioto.

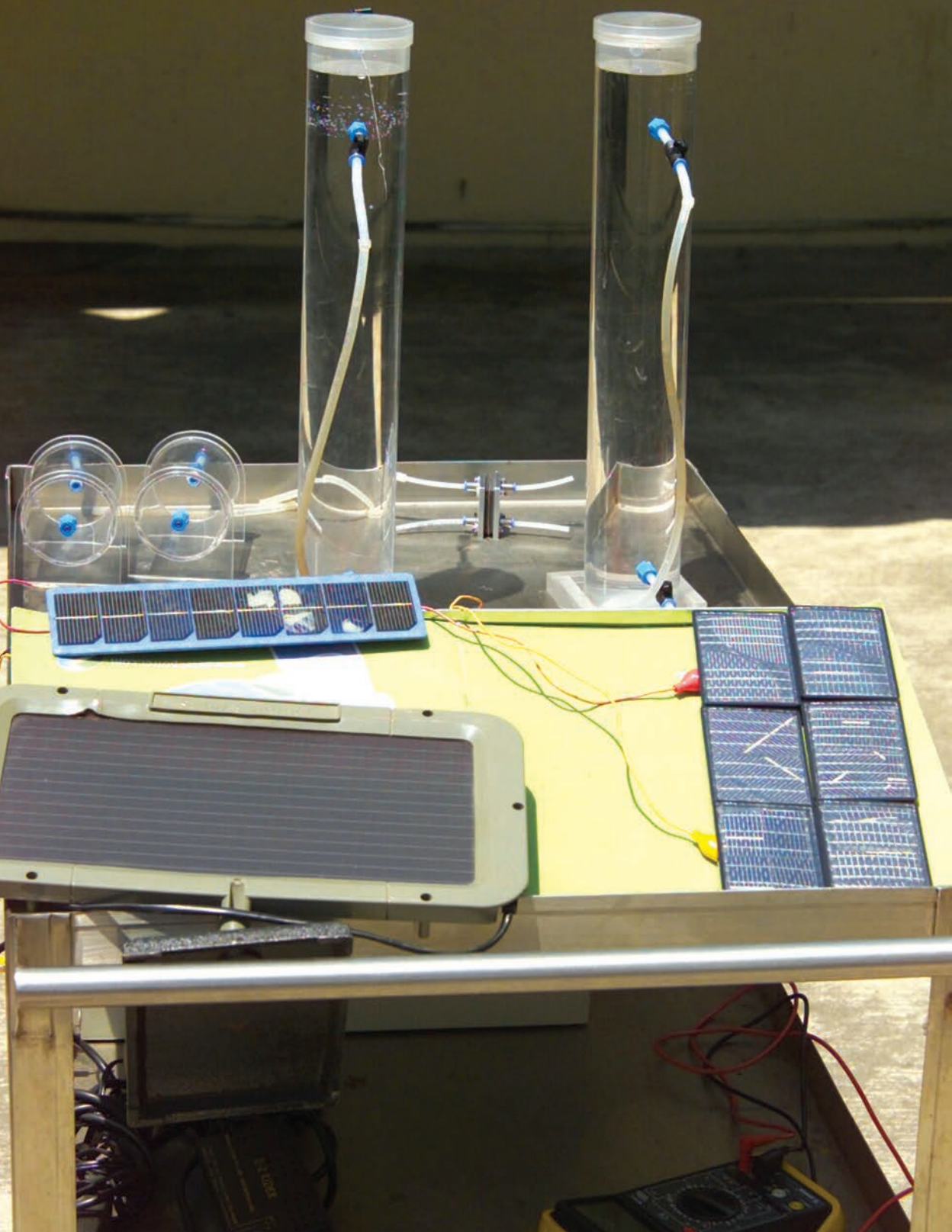
Figuras antes no conocidas aparecieron en el mercado nacional, como las empresas comercializadoras de “bonos de carbono”, que adquieren los derechos de evitar emisiones de éstos y otros gases para comercializarlos en el mercado internacional. La Oficina Nacional de Cambio Climático, entonces de reciente creación en el país, dio paso al registro de proyectos de esta naturaleza, entre los cuales destacan los relacionados con la destrucción del gas metano, cuya contribución al efecto invernadero es 21 veces más intensa que la del bióxido de carbono. El gas metano es el principal componente del biogás que se produce por digestión anaerobia de la materia orgánica contenida en las excretas animales y otros desechos. Así, muchos proyectos que en las grandes granjas porcinas y ganaderas, o en los rellenos sanitarios, pudieron haberse implementado para generación eléctrica utilizando el biogás como combustible, quedaron en simples instalaciones para quemar a cielo abierto el metano ahí producido. Con ello, los esfuerzos del IIE durante el Plan Piloto de la década anterior para promover la generación de electricidad con biogás de estas fuentes, y los esfuerzos previos para desarrollar las tecnologías correspondientes, fueron relegados a la etapa de estudios de prefactibilidad, pues la simple quema de metano requiere menos inversiones, es más rentable y menos complicada en términos institucionales, legales y tecnológicos, que la generación de electricidad. Ante esta circunstancia, las capacidades desarrolladas en el área de biomasa del Instituto se reorientaron hacia otros campos, como la incineración de residuos sólidos municipales o el aprovechamiento de diversas especies vegetales para la generación eléctrica mediante procesos distintos a la digestión anaerobia.

En el ámbito internacional, los mecanismos para el financiamiento de proyectos de energías renovables en el contexto del cambio climático se han multiplicado y han adquirido diversas modalidades. Uno de los más relevantes es el Fondo para el Medio Ambiente Global (GEF por sus siglas en inglés) que apoya, mediante aportaciones a fondo perdido, proyectos innovadores que eviten la emisión a la atmósfera de gases con efecto invernadero. Es aquí donde el área de energías renovables del Instituto encuentra una de las principales fuentes de financiamiento para iniciativas que desde tiempo atrás venían siendo consideradas. Con apoyo del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y luego de realizar todos los trámites correspondientes, investigadores del área de energía eólica obtuvieron la aprobación del proyecto: “Plan piloto para remover barreras a la implementación masiva de la energía eólica en México”. Este proyecto vino a fortalecer las actividades de medición y evaluación del recurso eólico en el país, facilitó la capacitación de recursos humanos mediante la formación de formadores de varias instituciones académicas en el tema de generación eoloelectrónica, propició la revisión del marco jurídico y legal que atañe al aprovechamiento de este recurso en el país, incentivó la creación de una norma ambiental para el emplazamiento de centrales eólicas en nuestro territorio, y apoyó la construcción del **Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE)** que ahora tiene el IIE en la Ventosa, Oaxaca, región donde se llevan a cabo los principales desarrollos de centrales eólicas del país.

Este proyecto permitió consolidar de manera importante el área de energía eólica del Instituto. En la práctica, contar con el CERTE, que es una instalación con características distintivas por el régimen de viento que priva en la región donde se ubica, permitió dar paso a otra iniciativa importante: el proyecto para desarrollar una turbina eólica con alto contenido de tecnología nacional, conocido como el proyecto de la **máquina eólica mexicana**, o **proyecto MEM**, en el que participan industrias y centros de investigación nacionales. Para su desarrollo se cuenta con el apoyo económico del Fondo SENER-CONACYT para la Sustentabilidad Energética. El prototipo de la turbina, una vez construido, será instalado y probado en el CERTE.



Haciendo eco de la experiencia ganada durante la gestión con el GEF mediante el apoyo del PNUD, el área de energía solar fotovoltaica logró finan-



ciamiento para el proyecto “Pequeños sistemas fotovoltaicos conectados a red” que, al igual que en el caso eólico, también fue un proyecto multianual que buscó identificar y remover barreras para la implementación masiva de esta tecnología fotovoltaica en México. El camino para la ejecución del proyecto fue un tanto paralelo al del proyecto eólico mencionado anteriormente, aunque en este caso se trataba de fomentar el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en los ámbitos residencial y comercial, como preámbulo a la instalación de centrales fotovoltaicas multimegawatt en nuestro país. La capacitación de recursos humanos en varios niveles, mediante la formación de instructores en las universidades, también fue uno de los puntos centrales del proyecto, que retomó las experiencias adquiridas en las diversas aplicaciones domiciliarias y comerciales que a lo largo y ancho del país fueron hechas por el IIE durante más de diez años.

La Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables está esencialmente confinada al ámbito del sector eléctrico. Con ello, las aplicaciones no eléctricas de estas fuentes energéticas, como es el caso del suministro de calor para proceso, no encuentran espacio, ni lineamientos de política, en el marco legal y programático que se ha venido elaborando en el país en los últimos años. Sin embargo, las aplicaciones no eléctricas de las energías renovables son un área de oportunidad de singular importancia en el país. Por ejemplo, se estima que el uso de las energías solar y del viento para producir diversas sales para exportación en las salinas de Guerrero Negro, en Baja California Sur, representan un ahorro de combustibles fósiles equivalente a millones de barriles de petróleo. De igual forma, el uso de calentadores solares de agua a nivel domiciliario, comercial e institucional, podría significar grandes ahorros de gas natural o gas LP, con el consecuente ahorro de divisas, ya que buena parte de estos combustibles son de importación.

En atención a esta área de oportunidad, el Instituto decidió impulsar el uso de la tecnología de canal parabólica para el suministro de calor de proceso en la industria. Así, el área de sistemas termosolares se dio a la tarea de desarrollar esta tecnología y aplicarla en instalaciones piloto, con el propósito de llevarla a madurez plena y transferirla a la industria nacional para su producción y comercialización. En el curso de este período se instalaron algunos módulos en ciertas aplicaciones.

Las **pequeñas centrales hidroeléctricas** fueron la base del suministro eléctrico en México antes de la creación de la CFE. Cientos de microcen-

trales de este tipo, con capacidades por debajo de los 2 MW, suministraban electricidad a pequeños poblados y para operaciones en las minas, en las fincas cafetaleras y en otros emplazamientos productivos, principalmente en el centro y sur del país, donde la orografía y el régimen pluvial dan viabilidad a estas tecnologías. Con el paso del tiempo muchas de estas instalaciones fueron abandonadas, bien por obsolescencia o falta de mantenimiento, o bien porque fueron desplazadas por el arribo de las redes eléctricas una vez que el sistema nacional de transmisión y distribución eléctrica comenzó a crecer.

La situación actual del IIE en este campo tecnológico refleja, en buena medida, la inactividad que priva a nivel nacional, donde los proyectos hidroeléctricos se dan principalmente en grandes centrales tipo Chicoasén y Malpaso y, gracias a los cambios recientes en el marco legal y regulatorio, actualmente surgen proyectos con pequeñas centrales, en el rango de los 6 MW a los 30 MW, realizados por el sector privado, donde se aprovecha la infraestructura de algunas presas hidráulicas previamente construidas con propósitos de riego agrícola. Las micro y minicentrales parecen no tener cabida, aun cuando su potencial de contribución en el esquema de generación distribuida se estima será grande y con importantes beneficios para el desarrollo social y económico regional. Ante tal circunstancia, la actividad del Instituto en este campo no ha tenido continuidad y cesó luego de que se concluyó la instalación de una minicentral hidroeléctrica para la electrificación del poblado de Tomatlán, Jalisco.

Los recursos energéticos renovables, principalmente el sol y el viento, son de naturaleza intermitente, lo que en buena medida representa una limitante para el suministro continuo de electricidad en aplicaciones fuera de red. En aplicaciones ligadas a la red eléctrica, la intermitencia del recurso representa retos para el despacho del sistema eléctrico en su conjunto, sin embargo, en condiciones climáticas favorables, estos recursos son complementarios, esto es, en ciertas regiones previo a la salida del sol y después del ocaso hay buena disponibilidad del recurso eólico. En ciertos casos, éstos son fenómenos que dependen de condiciones topográficas locales, como ocurre en áreas de convergencia valle-montaña o de agua-tierra. En otras regiones, el potencial hidroeléctrico es complementario a los recursos solar y eólico, o viceversa: en época de estiaje, el sol o el viento son intensos, pero disminuyen de manera apreciable en época de lluvia.

Los **sistemas híbridos solar/viento/microhidráulico/biomasa** permiten aprovechar de manera integral estos recursos y suministrar energía de una forma continua en períodos diarios o estacionales. Los trabajos en el IIE sobre el tema se han orientado a estudiar la complementariedad de los recursos eólico e hidráulico disponibles en gran escala en el sureste mexicano, y a desarrollar pequeños sistemas híbridos solar/eólico para soporte de actividades productivas en comunidades remotas sin acceso a la red eléctrica. En particular se trabaja sobre el desarrollo de soluciones en las que se integran los sistemas de generación eléctrica con los medios de producción para hacer más eficientes los procesos.

Las proyecciones de los organismos internacionales especializados señalan que las energías renovables podrían estar contribuyendo con la mitad de la electricidad que la humanidad estará consumiendo en el año 2050, esto motivado en buena medida por los problemas ambientales derivados del uso intensivo de combustibles fósiles, principalmente petróleo. México no puede sustraerse a los esfuerzos internacionales para mitigar el problema del cambio climático y, en consecuencia, ha establecido metas ambiciosas para reducir las emisiones a la atmósfera de gases con efecto invernadero, así como para la incorporación de energías limpias para la generación de electricidad. La ruta hacia el logro de estas metas solo tiene dos principales vías: el ahorro y uso eficiente de la energía, y la incorporación de las energías renovables y la energía nuclear. ¿Qué papel habrá de jugar el Instituto en las próximas dos o tres décadas en este campo? ¿Cuáles son los retos que los especialistas en energías renovables deberán enfrentar en la búsqueda de soluciones, tanto para el suministro de tecnologías como para su implementación masiva y sustentable en el



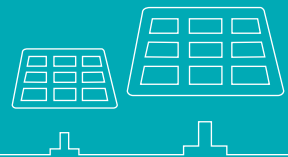
país? ¿Cómo habrán de adecuarse sus estructuras operativas, su infraestructura técnica de soporte, y sus cuadros de especialistas, a los marcos jurídicos e institucionales hacia los que seguramente evolucionarán los actuales, como una exigencia de la sustentabilidad energética nacional e internacional? En fin, ¿cuál será el papel de las áreas de energías renovables del IIE en un mundo donde estas formas de energía tendrán un papel cada vez más relevante?

Preguntas difíciles de responder, pues requieren de la convergencia de muchos puntos de vista basados en el análisis y la reflexión sobre el acontecer del tema energético en el ámbito nacional e internacional. De lo que podemos estar seguros en este momento es del valor que estas fuentes energéticas ofrecen al país: en el sector energético, para la diversificación y seguridad del suministro, desplazando petróleo de origen nacional hacia otras aplicaciones de mayor valor que la simple quema, inclusive la exportación, y sustituyendo combustibles importados, como el gas natural y el gas LP con biocombustibles; en el sector ambiental, evitando emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes; en el sector social, ampliando la cobertura del suministro energético en regiones donde por su lejanía y dificultad de acceso se hace difícil llevar otras formas convencionales de energía, y en el sector económico, creando las cadenas de valor que permitan la reconversión y reactivación industrial, y la consecuente creación de empleos. En estos momentos, el negocio global de las energías renovables es cercano a los 300,000 millones de dólares anuales. Es de suponerse que este monto irá incrementándose conforme crezca la participación de los recursos energéticos renovables en la economía mundial. ¿Qué porción de este negocio podrá ser internalizada en la economía nacional? Seguramente dependerá de las estrategias que para ello seamos capaces de crear e instrumentar, y de la oportunidad con que lo hagamos.



*Caminante, son tus huellas
el camino y nada más;
Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace el camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante no hay camino
sino estelas en la mar.*

Antonio Machado



**Memorias de una
fascinante y larga aventura**

Conocer el recurso

Los energéticos convencionales se localizan típicamente en yacimientos confinados y geográficamente definidos, tienen una alta densidad energética, pueden extraerse al ritmo que convenga a las economías, y pueden transportarse hasta los puntos de consumo. Las energías renovables, por el contrario, son de naturaleza dispersa, altamente dependientes del clima (salvo la geotermia y ciertas formas de energía de los océanos), de intensidad variable, algunas de ellas intermitentes en mayor o menor grado, y deben convertirse a energéticos secundarios en el sitio donde se manifiestan a fin de poderse aprovechar de forma práctica. Para complicar aún más la situación, las tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables son de muy diversa índole: no todas las turbinas eólicas son aptas para operar bajo un determinado régimen de viento, hay diversos tipos de celdas fotovoltaicas en el mercado, la conversión de biomasa a electricidad puede darse por distintas rutas tecnológicas, hay varios tipos de tecnologías termosolares para la producción de electricidad, y así sucesivamente. Pero por si esto fuera poco, los esquemas para su aprovechamiento son también de diversa índole, pues es posible la instalación de cientos o miles de unidades generadoras con unos cuantos kilowatts de potencia conectados a la red, hasta las grandes centrales de generación de cientos de megawatts (MW), pasando por unidades distribuidas de mediana potencia. Y, además, es posible anticipar, como resultado de la recientemente aprobada reforma del sector eléctrico, diversos modelos de negocio para el aprovechamiento de estas fuentes de energía, lo que tornará la situación aún más compleja, y más interesante.



Un buen conocimiento de la naturaleza de los recursos energéticos renovables es crítico cuando de inversiones para unidades de generación eléctrica se trata. El **costo nivelado de la electricidad**, definido en unidades monetarias por kilowatt-hora (\$/kWh), es un parámetro universalmente utilizado para comparar entre distintas fuentes de generación eléctrica, tradicionales y nuevas; y sirve también como ingrediente básico de las ecuaciones para determinar la rentabilidad de los proyectos de inversión en este campo. Este parámetro se calcula trayendo a valor presente la suma de todos los costos anticipados del proyecto (inversión, operación, mantenimiento, desmantelamiento, etc. —o como se dice en la jerga: “de la cuna a la tumba”—) durante el tiempo de vida útil de la planta generadora, y dividiendo el resultado de esta suma entre la electricidad que se anticipa producirá la planta durante ese mismo período. En el caso de las centrales con energías renovables, es en el denominador de esta ecuación donde un error en la determinación del valor del recurso puede llevar a resultados financieros catastróficos. Es por ello que, en la práctica, como condición para otorgar financiamiento para el desarrollo de este tipo de proyectos, las entidades financieras requieren evidencia fehaciente de que el recurso energético renovable de que se trate ha sido evaluado en el sitio del proyecto mediante la aplicación de las mejores prácticas internacionales.



Históricamente, el conocimiento sobre los recursos energéticos renovables se ha adquirido mediante estudios de campo con el uso de instrumentos de medición especializados. Ello implica inversiones para la adquisición e instalación de estaciones de medición, así como para el acopio y análisis de la información recabada. Dichas inversiones pueden ser grandes cuando se trata de levantar el inventario de estos recursos en un país con gran extensión territorial, como es el caso de México, pero son muy pequeñas en comparación con lo que se requiere, por ejemplo, para la exploración petrolera. En épocas más recientes han surgido métodos indirectos, basados en modelos matemáticos e información de satélites, que permiten obtener información a menor costo y de forma más rápida sobre los valores y las características de estos recursos. Pero todo parece indicar que el levantamiento de información en sitio por medio de instrumentos seguirá siendo indispensable, al menos para calibrar los resultados de los métodos indirectos.

El conocimiento a fondo del potencial de los recursos energéticos renovables a nivel mundial ha sido desde hace ya varios años preocupación de organismos internacionales y de muchos gobiernos, principalmente de los países avanzados, por lo que se han emprendido importantes programas para tal efecto. La Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés) conduce actualmente un programa denominado “Atlas Global de las Energías Renovables”, cuyo principal objetivo es acopiar información a nivel mundial y ofrecer mapas de los recursos, provenientes de los principales institutos de todo el mundo, incluyendo al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). En México, el Inventario Nacional de estos recursos es todavía una tarea pendiente, a pesar que desde hace siete años la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética indica que corresponde a la Secretaría de Energía “Establecer y actualizar el Inventario Nacional de las Energías Renovables, con programas a corto plazo y planes y perspectivas a mediano y largo plazo comprendidas en el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables y en la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía”, así como “Elaborar y publicar el atlas nacional de zonas factibles para desarrollar proyectos generadores de energías renovables”. Dos tareas sin duda muy importantes.

Un buen inventario de las energías renovables requiere no solamente de conocer la magnitud de estos recursos, sino además su distribución geográfica, sus variaciones en los ciclos largos, cortos y muy cortos, así como todos aquellos factores que de una forma u otra hacen que un mismo recurso muestre ciertas características en un sitio dado, y otras distintas en sitios aledaños. El caso del recurso eólico en La Ventosa, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, sirve para ejemplificar: la región es conocida por sus fuertes vientos, pero no son de la misma intensidad en toda la zona, ni a distintas alturas en un mismo punto, ni tienen el mismo grado de turbulencia, ni la misma intermitencia. Algo similar ocurre en cuanto al resto de las energías renovables, así que mantener actualizado el inventario implica trabajo sistemático de mediano a largo plazo ya que, como se dijo, estos recursos energéticos dependen fuertemente del clima y por lo que sabemos el clima es variable y la evidencia de que está cambiando en forma importante es cada día más clara. La tarea entonces consiste en crear series históricas de datos apegadas a las mejores prácticas internacionales, que faciliten la planeación energética regional, la toma de decisiones para la aplicación de inversiones, la planeación de

la expansión de la red eléctrica, así como las labores de ordenamiento territorial y ambiental.

En una acción de asistencia técnica al gobierno de México, en el año 2011 el Banco Mundial comisionó un estudio para definir varios de los requerimientos esenciales del inventario nacional de los recursos energéticos renovables. En ese estudio el consultor del banco hace propuestas de carácter metodológico para implementar un proyecto que desemboque en el inventario nacional y apunta que “en México se han realizado dos esfuerzos serios para construir inventarios de potenciales de energías renovables. Uno por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el otro del IIE”. Mientras que el de la CFE “está pensado para satisfacer las necesidades internas de ese organismo” los trabajos del Instituto se encaminan hacia la integración de una base de datos que pueda ser útil tanto para la planeación energética como para la toma de decisiones por parte de inversionistas, tanto del sector público como del sector privado.



Eólico

Debido a su ubicación geográfica, el territorio nacional se encuentra bajo la acción de dos grandes sistemas de vientos: el correspondiente al sistema tropical y el característico de las zonas templadas. Debido a ello, entre los meses de mayo y octubre casi la totalidad del territorio está bajo la influencia de los vientos alisios. En la costa del Pacífico, al sur del trópico de Cáncer, estos vientos actúan del continente hacia el océano, excepto durante los meses de mayo y junio en los cuales frente a la costa del Estado de Michoacán y hasta el Estado de Chiapas, se desarrolla un movimiento monzónico. En la península de Yucatán, por la concurrencia de las perturbaciones conocidas como ondas del Este, se observa en los niveles bajos un aumento en la intensidad de los vientos alisios. Dadas las características de la superficie del país y las diferencias de climas, es posible encontrar diversas regiones, en las que por la intensidad del viento, éste puede ser aprovechado para la generación eléctrica en pequeña, mediana y gran escala, así como para producir potencia mecánica para diversos fines, como el bombeo de agua.

Casi desde su creación, hace ya cuarenta años, el IIE emprendió trabajos de evaluación de los recursos energéticos renovables, aunque de manera esporádica y en sitios específicos, debido a las limitaciones presupuestales que aquejan a la investigación en nuestro país, particularmente en aquellas áreas que, como las energías renovables desde entonces, no han teni-



do un lugar importante en la política energética. Los primeros trabajos iniciaron en 1977 con el proyecto denominado “Aprovechamiento de la Energía Eólica” cuyas metas incluían la recopilación de información a nivel nacional sobre velocidades de viento, la aplicación de una metodología de prospección para determinar lugares con potencial eólico, emprender la evaluación del potencial energético de la zona de La Ventosa y evaluar el potencial energético eólico en la estación experimental que el Instituto tuvo en aquel tiempo en el sitio denominado El Gavillero, en el Estado de Hidalgo. Como parte de los primeros estudios se analizaron los datos de velocidades del viento registrados durante un período de 16 años (1961-1976) por 68 observatorios y 96 estaciones meteorológicas que en aquel entonces se encontraban operando en el territorio nacional. Ya en aquel tiempo se apuntaban las “dificultades de normalización, dada la utilización de una gran variedad de tipos y marcas de equipos de medición” y se iniciaban los trabajos de diseño de un “sistema de procesamiento de datos, enfocado no solamente al recurso energético eólico, sino al de fuentes no convencionales en general”.

Con más de 2,500 MW instalados, y potencialmente otros 3,000 o más por instalar, La Ventosa se ha convertido en el núcleo del desarrollo eólico nacional y un polo de atracción para empresas que buscan autoabastecerse de electricidad, desarrolladores de proyectos eólicos, proveedores de aerogeneradores, e inversionistas. La actividad económica en la región ha crecido de manera importante, no sin dificultades y algunos problemas de corte socio-político. Pero hace treinta y cinco años poca gente imaginaba que las cosas iban a ser así en esa región. El viento ahí no representaba más que dificultades para el tráfico en las carreteras y limitaciones para el desarrollo agrícola, ya que muchas especies vegetales tienen dificultades para adaptarse a esas condiciones climáticas.

Con el patrocinio de la CFE, a finales de la década de 1970 el IIE instaló en La Ventosa dos estaciones anemográficas con las que se registraron velocidades del viento superiores a los 40 km/h, con más de 2,000 horas de duración en el período de un año. A partir de esta información, investigadores del entonces Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía, actualmente Gerencia de Energías Renovables (GER-IIE) concluyeron que ese lugar parecía ser “el más propicio para la instalación de aerogeneradores en gran escala”, y apoyándose en información del Observatorio Meteorológico de Salina Cruz, Oaxaca, así como en información del entonces Plan Nacional Hidráulico y del extinto

CETENAL, elaboraron los primeros escenarios para la instalación en La Ventosa de hasta 920 MW de capacidad con turbinas eólicas de entre 2 MW y 4 MW cada una. La visión de entonces puede parecer limitada a la luz de lo que ahora se tiene instalado y proyectado en esa zona; sin embargo, los escenarios fueron hechos considerando la infraestructura eléctrica existente en aquel tiempo en la zona. El caso de La Ventosa es paradigmático en cuanto a la importancia de la evaluación de los recursos energéticos renovables en sitio, los tiempos que toma el desarrollo de su potencial, y la multiplicidad de factores que intervienen en el proceso.

Los estudios del Instituto sobre el recurso eólico han llevado a identificar varias regiones del país cuyo potencial es muy atractivo para la generación eoloelectrónica. Entre las regiones con mayor potencial destacan: la Rumorosa en Baja California; la región pacífico norte de Baja California Sur; el sur del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca; la región noreste de Tamaulipas; la zona costera del Estado de Veracruz; la zona costera norte de la península de Yucatán; la franja Este del Estado de Puebla que colinda con el Estado de Veracruz; y algunas zonas del Estado de Zacatecas. A pesar del escaso presupuesto destinado a la prospección del potencial eólico, hacia el año 2005 la GER-IIE había evaluado algunas zonas específicas, como la Región Pacífico Norte del Estado de Baja California Sur, la Isla del Carmen en Campeche, Samalayuca y Ciudad Cuauhtémoc en Chihuahua, Pachuca en el Estado de Hidalgo, Moroncarit en Sonora, Laguna Verde en Veracruz, la franja fronteriza del Estado de Nuevo León, La Ventosa en Oaxaca, Playa Paraíso en Quintana Roo, y el Cerro de la Virgen en Zacatecas.

La labor para realizar la prospección del viento por parte del IIE ha sido ardua, pero muy gratificante. Miles de kilómetros recorridos por caminos de terracería, y a veces inexistentes, a lo largo y ancho del país para identificar los sitios con mejores condiciones para la instalación de estaciones anemométricas; largas jornadas con actividades de riesgo (y algunos accidentes severos, aunque afortunadamente no fatales) para la instalación de los instrumentos arriba de delgadas torres metálicas de 40, 60 y hasta 80 metros de altura, expuestas a intensos vientos; complicaciones logísticas para recuperar la información capturada y almacenada en los adquirentes de datos ubicados en sitios de difícil acceso y sin posibilidades de conexión remota; frustraciones ante los recurrentes actos de vandalismo y robo de los equipos para la medición y recolección de datos; etc. Con todo y ello, entre 2004 y 2006 la GER-IIE logró instalar



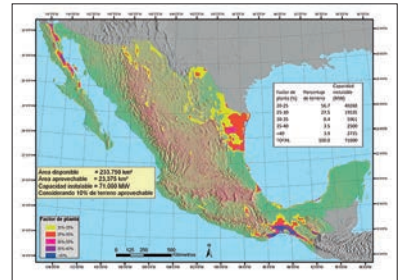
con apoyo económico del Fondo para el Medio Ambiente Global (GEF por sus siglas en inglés) a través del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) una red de 20 estaciones anemométricas de alta calidad en sitios estratégicos del país. Y del 2009 al 2011 la GER-IIE instaló otras 20 estaciones anemométricas en colaboración con instituciones de educación superior, como parte de las actividades del Laboratorio Nacional para la Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables en México.

La red de estaciones que ha instalado y opera el Instituto es actualmente la más extensa del país en términos de su cobertura geográfica (aunque no con la suficiente densidad para un territorio de casi dos millones de kilómetros cuadrados) y sirve de referencia tanto para la modelación de microescala en sitios específicos, como para el ajuste de modelos a mesoescala en regiones más amplias. La red está conformada con estaciones que van de los 20 a los 80 metros de altura y cuentan con equipo calibrado para medir viento, humedad, temperatura, presión y radiación solar. La red se va actualizando tanto en equipo como en ubicación geográfica para obtener datos cada vez más confiables y de mayor utilidad en sitios nuevos. El número de estaciones de medición va en aumento dependiendo de la disponibilidad de recursos económicos, y actualmente ya son más de una centena de lugares en los que el recurso eólico ya fue medido por el IIE en diversas campañas.

El estudio del Instituto sobre el potencial eólico del país incluye también trabajos de modelación para elaborar la cartografía del recurso. De gran relevancia para tal fin ha sido el trabajo que se llevó a cabo en 2009 en colaboración con el Centro de Ciencias de la Atmósfera, de la UNAM, para la creación de una base de datos conformada por información horaria de la velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, humedad relativa y presión barométrica, de los años 2005 al 2007, en capas a 50 y 80 metros de altura sobre el nivel del terreno, con una resolución de 5 km x 5 km. Esta información ha sido muy útil para correr los modelos que han permitido estimar en primera aproximación y en forma relativamente rápida, el potencial eólico en todo el territorio nacional, con lo cual se solventa en forma temporal el reto que representa la complejidad del terreno del país, así como el tiempo y costo requeridos para instalar una amplia y densa red de estaciones de monitoreo. Tanto las elevaciones del terreno, que van desde el nivel del mar hasta cerca de los 5,800 metros, como sus grandes litorales, propician la generación de fuertes gra-

dientes térmicos que a su vez provocan corrientes de viento locales, que, aunadas a los vientos de altura, hacen más difícil el conocimiento del potencial con fines energéticos.

A solicitud de la Secretaría de Energía (SENER), en el año 2010 la GER-IIE elaboró los primeros mapas nacionales del recurso eólico, tanto en lo que se refiere a velocidades del viento como a la densidad de potencia de este recurso. Los resultados entregados incluyeron un total de 52 mapas nacionales interactivos vía Internet, tanto de velocidad del viento como de densidad de potencia del viento, mensuales y anuales, a 50 y 80 metros de altura; así como mapas nacionales con delimitación de las zonas de mejor aprovechamiento del potencial para la generación eolieléctrica, tanto por su potencial como por los factores de planta alcanzables. Con base en esta información y empleando curvas características de operación de aerogeneradores disponibles en el mercado se estimaron los factores de planta que podrían lograrse en centrales eolieléctricas instaladas en distintas partes del país. De esta manera se determinó un potencial aprovechable mediante instalaciones eolieléctricas con factores de planta del 20% o más, cuantificado en 71,000 MW.



Estos mapas, junto con los correspondientes sobre energía solar también elaborados por la GER-IIE, fueron dados a conocer al mundo por el Presidente de México durante la reunión de la 16ª Conferencia de las Partes (conocida como COP-16) sobre el cambio climático celebrada en Cancún en diciembre de 2010. Ya para entonces varias empresas tenían instaladas estaciones anemométricas en algunos sitios del país con miras a integrar las bases de datos que les permitieran eventualmente obtener financiamiento para construir centrales eólicas, y otras empresas extranjeras se habían instalado localmente para comercializar datos simulados del recurso para los desarrolladores de proyectos eólicos. A la vez, algunos gobiernos locales, notablemente los de Nuevo León y Guanajuato, habían contratado a dichas empresas para elaborar los correspondientes mapas eólicos estatales.

La diversidad de valores sobre el potencial de un mismo recurso indujo a la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) a cuestionar abiertamente los datos presentados en los mapas elaborados por la GER-IIE, lo que a su vez motivó a la SENER a tomar dos acciones sobre el particular: la primera, quitar de su página *web* la liga que daba acceso a los

mapas eólicos interactivos elaborados por el IIE; y la segunda, crear un grupo de trabajo interinstitucional y encargarlo de elaborar el inventario de la energía eólica del país. Luego de algunas muy largas, y poco estructuradas reuniones en las instalaciones de la propia Secretaría, el grupo de trabajo se fue desintegrando hasta desaparecer. Por su lado, y con el objeto de aclarar cualquier duda que pudiera haber en cuanto a la validez de los mapas elaborados por el Instituto, se organizaron talleres con los expertos nacionales y extranjeros en evaluación del recurso eólico, tanto de las empresas pertenecientes a la AMDEE como de las empresas que producen datos y mapas mediante modelos matemáticos. En estos talleres se compararon las metodologías seguidas por cada grupo, luego de lo cual se dejó en claro que las diferencias en los valores sobre el potencial obedecían a diferencias en los supuestos para el análisis, pero había coincidencia en cuanto a las metodologías seguidas y a la ubicación de las zonas de mejor potencial en el país. Quedó claro también que las predicciones del IIE eran las únicas provenientes de modelos calibrados con mediciones en campo.

Los avances en la tecnología de aerogeneradores eólicos permiten hoy en día aprovechar vientos de muy baja velocidad, por lo que seguramente el potencial eólico del país será mucho mayor que los 71,000 MW estimados por el Instituto hace ya algunos años. Pero hay todavía mucho más que hacer en relación con el estudio del recurso eólico nacional. Esto tiene que ver, ya no necesariamente con la magnitud del recurso y su ubicación en la geografía nacional, sino con información sobre su comportamiento dinámico en el corto y muy corto plazos, que ayude a resolver los problemas que se anticipan para la integración a red de una gran cantidad de aerogeneradores. Con este propósito, la GER-IIE trabaja junto con especialistas de la Universidad Técnica de Dinamarca en un proyecto financiado por el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, de la SENER, con el objetivo de refinar el conocimiento que se tiene sobre el recurso eólico nacional y crear nuevas bases de datos que ayuden a los planificadores y controladores del sistema eléctrico en sus correspondientes tareas.

Solar

Sin duda el recurso solar es abundante en México. La ubicación geográfica de nuestro país, en el seno de lo que se conoce como un “cinturón de radiación solar” del globo terrestre, le da una alta exposición a los rayos solares a lo largo del año, por lo que la cantidad de energía que diariamente recibe nuestro territorio supera en mucho los requerimientos energéticos de nuestra sociedad. Sin embargo, el flujo solar que llega a la superficie terrestre es intermitente, no solo por el ciclo día-noche sino también por el paso de nubes; y varía en intensidad de un punto a otro de la geografía nacional y a lo largo de las estaciones del año. Por otro lado, la tecnología existente para la conversión de la radiación solar en electricidad es de muy diversa índole y, en función de su naturaleza, aprovecha solamente algunas porciones del espectro solar. De ahí la necesidad de realizar estudios que permitan un conocimiento lo más detallado posible sobre las características de la radiación solar y su distribución geográfica en el territorio nacional, así como los efectos que tienen el clima, el polvo, la contaminación atmosférica y la humedad del ambiente sobre la cantidad y calidad de la energía solar que puede ser aprovechada en un sitio dado.

El estudio de la energía solar en México tiene ya una historia de más de 50 años, con epicentro muy definido en el Instituto de Geofísica de la UNAM, en donde actualmente radica el Observatorio de Radiación Solar, y cuyos trabajos le han valido el estatus de Centro Regional para la Medición de la Radiación Solar otorgado por la Organización Meteorológica Mundial. Pero también existen otros organismos e insti-



tuciones académicas, entre los que se cuenta el IIE, que desde hace muchos años realizan estudios sobre el recurso solar, tanto con fines energéticos como para fines climatológicos, agrícolas, biológicos y de otros tipos. Estos estudios han llevado a la elaboración de mapas mensuales estacionales y anuales de radiación global, directa y difusa que incide en el territorio nacional. Algunos mapas han sido generados a partir de modelos que emplean información proveniente de satélites y observaciones de cobertura de cielo, mientras que otros han sido elaborados a partir de modelos estadísticos, pero éstos son menos precisos debido a lo escaso de la información fuente con que se cuenta en la actualidad.

Hay dos rutas para la conversión de la energía solar a electricidad: la ruta fotovoltaica, que utiliza la radiación solar global y la ruta fototérmica que solo aprovecha la radiación solar directa. Esto indica que en los estudios que se requieren para cada caso se emplean métodos e instrumentos distintos y especializados, aunque también conllevan elementos comunes a ambos. Es así que por muchos años diversas instituciones han instalado redes de estaciones para el monitoreo de la radiación solar global, por lo que se cuenta con información que permite al menos calibrar parcialmente los modelos matemáticos. Pero en el caso de la radiación solar directa, que es de utilidad para el desarrollo de proyectos termosolares a concentración para generación eléctrica y producción de calor de proceso, no existen mediciones sistemáticas; la poca información que hay ha sido obtenida esencialmente con fines de investigación científica en instituciones más especializadas.

La preocupación del Instituto por la falta de información precisa sobre el recurso solar del país, lo que representa una de las barreras de entrada para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica, data ya de muchos años atrás. A finales de la década de 1980, la GER-IIE convocó a todas las instituciones que a nivel nacional se sabía realizaban algún tipo de trabajo relativo al recurso solar, a fin de llevar a cabo un taller sobre la importancia de contar con información confiable para dar impulso al aprovechamiento de la energía solar en el país. Además de las instituciones académicas de reconocida trayectoria en este campo, como el Instituto de Geofísica, el entonces Laboratorio de Energía Solar (hoy Instituto de Energías Renovables) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, participaron en este taller organismos tales como el Servicio Meteorológico Nacional, Aeropuertos y Servicios Auxiliares, y la Marina Armada de México. Uno de los propósitos de dicho taller fue conocer



el estado de avance que entonces se tenía en el país en cuanto al conocimiento del recurso solar, y explorar formas de cooperación entre los especialistas, que permitieran avanzar más rápidamente hacia la integración de una base de datos nacional sobre el recurso. Fue de gran valor conocer los resultados del trabajo de los grupos individuales, incluyendo los modelos matemáticos desarrollados localmente, las bases de datos y los mapas solares elaborados para ayuda a la helioarquitectura y para otros propósitos.



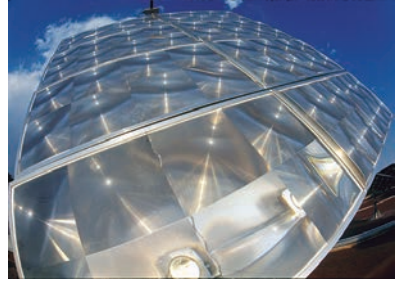
Pero a la vez un tanto desalentador constatar las pocas posibilidades de intercomparar resultados debido a la gran diversidad de instrumentos en uso para medir la radiación solar, que debido a la falta de presupuestos era muy difícil mantener en buen estado las pequeñas redes de instrumentos existentes, que en un buen número de casos las mediciones se llevaban a cabo solamente como proyectos de tesis por lo que las series de

datos eran de muy corta duración y quedaban sin resguardo al terminar el trabajo, y que no existía homologación en cuanto a los métodos utilizados para construir las bases de datos, lo que representó una limitante importante para construir en ese momento una primera base de datos nacional sobre el recurso solar. La situación hoy en día no es muy distinta de lo que ocurría 25 años atrás, aunque ahora hay empresas en el país que venden bases de datos sintéticas sobre el recurso solar nacional (esto es, construidas con base en información de satélites y modelos matemáticos) que de una forma u otra ayudan a los desarrolladores de proyectos de generación eléctrica con energía solar, pero que aún carecen de validación con datos medidos en sitio, en buena medida por la falta de éstos.

El curso histórico de las actividades en el IIE relativas a la medición y evaluación del recurso solar no ha sido distinto del de otras instituciones. Las primeras mediciones se llevaron a cabo a finales de la década de 1970 en las instalaciones del Instituto en Cuernavaca, Morelos, utilizando un instrumento conocido como *actinógrafo*. Este instrumento opera con base en la deflexión relativa de elementos bimetálicos cuando sobre ellos incide la luz solar, y cuyo desplazamiento, proporcional a la intensidad de la radiación que reciben los elementos, se dibuja por medio de una pluma sobre la escala de un papel especial enrollado en un cilindro que gira gracias a un mecanismo de relojería. Este instrumento

fue muy utilizado en el mundo para estudios climatológicos y agronómicos, pero debido a que la información se registra en forma gráfica, y a que el instrumento requiere calibraciones periódicas, su uso no resultó práctico para estudios con fines energéticos. Pero era lo único con que se contaba entonces.

El siguiente paso en cuanto a medición del recurso solar en el IIE se dio en el contexto del proyecto de aire acondicionado solar que se ejecutó en la ciudad de Mexicali, Baja California, a principios de la década de 1980. En este caso se instaló un instrumento llamado *piranómetro* que produce señales eléctricas proporcionales a la intensidad de la luz solar que recibe. Estas señales eléctricas pueden ser convertidas en datos digitales que pueden ser almacenados para su posterior tratamiento y uso. A este proyecto siguieron algunos otros de generación eléctrica con paneles fotovoltaicos, que fueron equipados con instrumentos similares para medir la energía solar en el sitio, y de los que se obtuvo información que ha servido para integrar una incipiente base de datos.



Debido a las limitadas oportunidades de obtener información solarimétrica medida en campo, en el año 2000 la GER-IIE recurrió al empleo de información de irradiación extraterrestre y global media mensual de 117 sitios en la República Mexicana, obtenidos de imágenes de satélite, para elaborar mapas de irradiación global, directa y difusa. Y en el año 2004 elaboró una serie de mapas de irradiación solar global, directa y difusa, utilizando un modelo matemático desarrollado en la Universidad Veracruzana. Este modelo se basa en la cobertura de cielo dada en promedios mensuales de días nublados, medio nublados y despejados. Como fuente de información se tomó la contenida en la base de datos ERIC creada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En total se determinaron los valores para 2000 estaciones que contaban con más de 10 años de datos. Finalmente, en el año 2010 la GER-IIE elaboró mapas de irradiación global, directa y difusa, a partir de datos medidos en estaciones terrenas. Previo tratamiento estadístico para reducir el margen de error de la información, se emplearon datos de 400 estaciones solarimétricas (y se desecharon datos de otras casi mil estaciones), proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, la Comisión Federal de Electricidad, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), el Servicio Meteorológico Nacional,

y el propio Instituto. Esos mapas nacionales fueron también presentados por el Presidente de la República con motivo de la COP-16 mencionada anteriormente en el caso de los mapas eólicos. La información contenida en ellos representa una primera aproximación al potencial nacional de este recurso, la cual podrá ser mejorada en cuanto se obtengan series de datos más confiables y de más largo alcance.

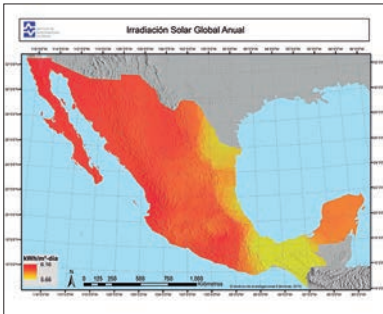
Para continuar con la actividad de medición en campo, entre el año 2008 y el año 2011 la GER-IIE instaló una red de 30 estaciones de monitoreo de radiación solar en igual número de sitios en el país. También cuenta con dos estaciones solarimétricas, una en Cuernavaca, Morelos, y otra en Xalapa, Veracruz, las cuales monitorean radiación global, directa, difusa y de onda larga; temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad y viento. Los datos se integran a la base general del sistema de información geográfica y se comparten con instituciones de investigación superior donde son utilizados en diversos estudios para determinar el potencial de generación eléctrica.

En el caso de la radiación solar directa, el acopio de información de campo sigue siendo un asunto pendiente de gran trascendencia. El siguiente caso puede dar una idea de lo que implica no contar con información confiable y oportuna sobre la radiación solar directa disponible en el país: en 1999, el GEF incorporó a su programa de trabajo para acelerar la reducción de costos y adopción comercial de tecnologías de generación eléctrica de gran escala y cero emisiones de carbón, un proyecto solar térmico híbrido a realizarse en México, para el cual destinó un donativo de poco más de 49 millones de dólares. El proyecto original establecía que con ese recurso la CFE habría de construir una planta solar térmica de canal parabólica con capacidad eléctrica en el rango de 25 MW a 35 MW, la cual estaría adosada a una central de ciclo combinado a gas de 271 MW que la Comisión tenía planeado construir en la Ciudad de Mexicali, Baja California. Luego de varios ajustes al proyecto y cambios en el sitio para la construcción y en la fecha de terminación, se decidió que el proyecto sería construido en la localidad de Agua Prieta en el Estado de Sonora.

En el curso de este periplo, la GER-IIE fue requerida por la CFE para realizar estudios de integración de la planta solar a la planta de ciclo combinado a gas. La primera dificultad fue que la Comisión no contaba con una base de datos de radiación solar directa que permitiera llevar



adelante los estudios, por lo que hubo necesidad de recurrir a tomar datos de radiación solar directa medidos en otras localidades del noroeste de México y del sur de los Estados Unidos y crear información sintética para la localidad de Agua Prieta. A mediados del 2014 el proyecto aún no se había concluido, y su potencia nominal había sido reducida a 14 MW (con el mismo presupuesto), en cierta medida porque las empresas participantes en las varias licitaciones que realizó la CFE para este proyecto fueron renuentes a asumir el riesgo que representaba el no contar con una base de información confiable sobre la radiación solar directa en el sitio, ya que los términos del contrato estipulaban el compromiso de entregar una determinada cantidad diaria de calor de origen solar al ciclo combinado.



Las plantas solares a concentración tienen gran potencial en México dada la intensidad de la radiación solar y la disponibilidad de terreno en zonas desérticas y semi-desérticas, y además porque esta tecnología ha probado su capacidad para operar las 24 horas al día mediante sistemas de almacenamiento de calor. Por ello en la GER-III se han realizado estudios para identificar regiones óptimas para el desarrollo de proyectos de este tipo, tomando en cuenta las limitaciones que pueden existir en cuanto a la pendiente del terreno, la cobertura del suelo y la disponibilidad local de radiación solar directa. Por medio de estos estudios se ha encontrado que aproximadamente el 5% del territorio nacional reúne muy buenas condiciones para tal propósito; además hay indicios de que a lo largo de todo el territorio se podría habilitar al menos otro 5% de la superficie cuyas características son cercanas a lo óptimo. De esta forma, se considera que en los dos millones de kilómetros cuadrados de la parte continental de México hay al menos 200,000 km² que reúnen los requisitos para generar calor de proceso y electricidad mediante plantas de concentración solar, lo cual amerita estudios a mayor profundidad para determinar el potencial real económicamente aprovechable de esta tecnología.

Biomasa

La biomasa, tanto de origen vegetal como de origen animal, constituye un recurso abundante en el país, pero debido a su diversidad y a su dispersión geográfica resulta muy difícil de medir y cuantificar su potencial a nivel nacional. Investigadores de instituciones académicas, organismos del sector público, órganos de la sociedad civil, e incluso organismos de otros países han abordado el tema del potencial de la biomasa en México con fines energéticos. Entre los varios estudios existentes algunos han sido muy específicos para determinado tipo de biomasa, otros muy puntuales desde el punto de vista geográfico, y otros más de naturaleza prospectiva. Las aportaciones del IIE en este campo han sido también principalmente de naturaleza regional o local, con la determinación de potenciales de los desechos de algunas plantaciones, como la caña de azúcar, de desechos de granjas porcinas, y de biogás de rellenos sanitarios, junto con algunas estimaciones del potencial que representan los desechos forestales.



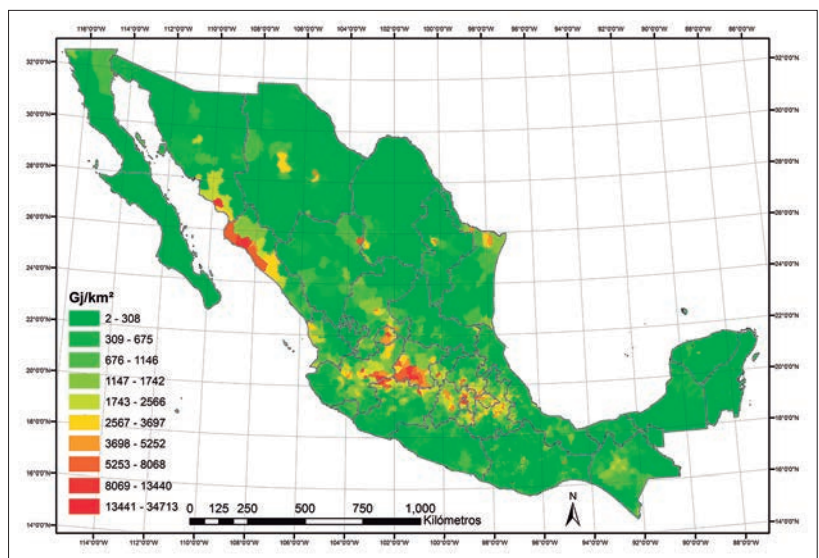
Con el propósito de tener una visión más amplia del potencial que representan los desechos agropecuarios para la generación de electricidad en el país, en la GER-IIE se elaboraron mapas que muestran las zonas con mayor densidad de energía derivable de tales desechos. Los mapas brindan la posibilidad de conocer la cantidad de energía por municipio que aporta cada una de las especies animal y cada fuente agrícola. Los primeros mapas fueron generados por la GER-IIE en el año 2005 utilizando un método propio, para lo cual se utilizaron datos reportados en la base de datos AGROS, edición 1996, que es elaborada a partir de la información recabada del VII Censo Agropecuario realizado por el INEGI en el año 1991. La base de datos AGROS contiene información a nivel de Área Geoestadística Básica rural de todos los municipios del país relacionada con los principales cultivos y todo el sector agropecuario; en total son 236 variables. Para la elaboración de los mapas se seleccionaron las variables más representativas correspondientes a las categorías agrícola y pecuaria, y solamente se tomó en cuenta la caña de azúcar considerada en la sección de lo forestal según el INEGI. En el año 2010 la GER-IIE elaboró una nueva serie de mapas del potencial biomásico



municipal. Para esta generación de mapas se utilizaron los resultados del Censo Agropecuario realizado por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística en 2007. En esta estimación se incorporó la parte forestal y los Residuos Sólidos Urbanos.



El potencial de la biomasa en el país estimado con el método descrito es muy grande y se calcula que puede soportar la operación de una capacidad de generación eléctrica de entre 30 GW y 143 GW (de la mitad a más del doble de la capacidad de generación actualmente instalada en México), según los tipos de biomasa que se incluyan en el cálculo. Pero resta mucho por hacer para determinar el potencial firme disponible al considerar las variaciones en la producción de biomasa que pudieran darse como resultado de los cambios de clima, las variaciones en los patrones de cultivo, y los posibles cambios en el uso de suelo. También resta determinar el potencial económicamente aprovechable en función de las distintas rutas tecnológicas disponibles para la conversión de la biomasa a energía, y de las restricciones ambientales y de uso de agua para los cultivos que la autoridad imponga.



Minihidráulico

La principal institución que en México ha estudiado el comportamiento de los ríos permanentes con fines de generación eléctrica ha sido la CFE. Para ello dispone de sistemas de monitoreo propios y cuenta con el apoyo de otras instituciones que le proveen de datos. Sin embargo, los estudios de la Comisión han estado principalmente enfocados a caracterizar el recurso en las cuencas donde se podrían ubicar centrales hidroeléctricas de cientos de MW de capacidad y, en algunos casos, para el desarrollo de proyectos menores, de algunas decenas de MW. De esta forma, el estudio del potencial minihidroeléctrico del país, para el desarrollo de proyectos menores a 5 MW de capacidad, no ha sido hasta ahora una prioridad del sector energético, pero se espera que esta situación cambie como resultado de la reciente reforma eléctrica.

A mediados de la década de 1980, el Departamento de Electrificación Rural de la CFE solicitó al IIE llevar a cabo trabajos para identificar los recursos hidroenergéticos a pequeña escala, cercanos a las poblaciones rurales aisladas carentes de energía eléctrica y con escasa o nula posibilidad de electrificación. Fue así como la GER-IIE se inició en el estudio del potencial de este recurso. Los primeros trabajos se orientaron a explo-





rar la posibilidad de generar electricidad en algunos puntos de los canales de riego existentes en el noroeste del país, habiendo encontrado en forma preliminar la posibilidad de instalar pequeñas centrales hidroeléctricas hasta por una capacidad total cercana a 300 MW. Y fue mediante estos estudios que se ubicó el sitio en donde se habría de instalar una minicentral hidroeléctrica que desarrolló la GER-IIE.

Aun no se conoce el 100% del pequeño potencial hidroenergético de México. En 1995 la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE (hoy Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE), comisionó el estudio de algunas regiones del país en las que se determinó la existencia de un potencial cercano a los 3,200 MW. Esta cifra se ha venido utilizando como un referente sobre el potencial minihidroeléctrico del país, pero aún queda mucho por explorar. Se estima que en el 40% del Estado de Veracruz el potencial minihidráulico viable es de 475 MW, y se han ubicado al menos seis regiones similares en el sur del país que requieren ser evaluadas. Algunas otras instituciones han llevado a cabo estimaciones en ciertas cuencas, sobre todo en la región de los Estados de Puebla y Veracruz; sin embargo, los estudios datan de varios años por lo que se desconoce su estatus y por lo tanto se desconoce el potencial real de esas regiones.



El potencial minihidráulico de México, aunque no ha sido formalmente evaluado, se considera abundante pues existen todas las condiciones para ello como lo son la alta precipitación en zonas montañosas y el desnivel importante del terreno. También existe gran cantidad de presas relativamente pequeñas pero que cuentan con suficiente recurso hidráulico que puede ser aprovechado mediante la instalación de minicentrales hidroeléctricas. Por ejemplo, estudios llevados a cabo por el Instituto sobre las presas y embalses existentes en el Estado de Hidalgo señalan un potencial cercano a 16 MW, distribuidos en 30 sitios de interés; la falta de recursos económicos y de información dejaron pendientes de estudio otros 30 sitios.

En la GER-IIE se han realizado tareas tendientes a elaborar cartografía del potencial minihidráulico del país utilizando sistemas de información geográfica, para lo cual se ha trabajado en la delimitación de cuencas, el trazo de los ríos para conocer su perfil, la selección de puntos con caídas importantes y, con apoyo en bases de datos de caudales disponibles en México

para muchos puntos del país, se ha determinado el potencial para algunos ríos, específicamente, los ríos Colorado, Verde, Tehuantepec, Actopan, Tuxpan y Tomatlán. El problema para dar continuidad a estos estudios radica principalmente en la falta de información sobre los caudales y en la variabilidad de estos valores, aunque existen posibilidades de hacerlo incorporando técnicas estadísticas y recurriendo a modelos de pronóstico, lo cual, como es de imaginarse, complica esta actividad.



Otra alternativa es recurrir a la información con que cuenta la CFE en otras de sus áreas. Con tal propósito se iniciaron gestiones con el área hidroeléctrica de la Subdirección de Construcción, que cuenta con un importante acervo sobre el recurso hidráulico de México, acopiado a lo largo de los años como parte de los estudios para la construcción de las centrales hidroeléctricas.

Sin embargo, no fue posible concretar los convenios que otorgaran al IIE la posibilidad de utilizar dicho acervo para propósitos de avanzar en el estudio del pequeño potencial hidroeléctrico del país.

Quedaba todavía la posibilidad de lograr algún acuerdo con la Gerencia de Ingeniería Civil de la Subdirección de Generación de la propia Comisión. Esta área es la responsable de realizar el monitoreo de las cuencas hidrológicas del país donde se ubican las centrales hidroeléctricas propiedad de la CFE, a fin de poder llevar a cabo la ejecución anticipada de operaciones relativas al manejo de los sistemas de dosificación de aguas, tanto para la generación de electricidad como para salvaguardar la seguridad de los embalses. La información generada en las redes de estaciones permite estimar los volúmenes de escurrimientos hacia las presas, utilizando para ello modelos de predicción. Esta información ayuda a la Comisión a administrar mejor el recurso hidroenergético evitando los derrames de agua por los vertedores de las presas y aumentando así la eficiencia de sus centrales.

Al tiempo que se establecieron los contactos con los responsables de esta área en la CFE, ellos se encontraban buscando alrededor del mundo tecnologías para modernizar la red de estaciones hidroclimatológicas que desde décadas atrás venían operando con procedimientos anacrónicos, considerando que se trata de una de las empresas eléctricas más grandes del mundo. Las estaciones hidroclimatológicas utilizadas eran de operación manual, o semi-automáticas en el mejor de los casos, y

la información era obtenida mediante lecturas directas por parte de los operadores, quienes la comunicaban vía radio o por teléfono a las oficinas de las Divisiones Hidrométricas correspondientes; y éstas a su vez la retransmitían por radio o por teléfono a oficinas nacionales en la Ciudad de México, para ser procesada y con base en ello definir los cursos de acción para la operación eficiente y segura de las centrales. Son fáciles de imaginar las complicaciones logísticas de esta operación, al igual que las posibilidades de error en la obtención y el registro de los datos, debido a la lejanía y a lo agreste del terreno donde se ubican las estaciones; principalmente en la temporada de lluvias cuando la oportunidad y la confiabilidad de la información son más críticas para la operación de los embalses.

La alternativa lógica era migrar hacia estaciones hidroclimatológicas automáticas y con teletransmisión electrónica de datos. Luego de varias reuniones, la Comisión aprobó la propuesta de la GER-IIE de instalar una estación como prueba de concepto y demostración. Se eligió entonces el sitio denominado Papalutla, en el Estado de Guerrero, correspondiente a la cuenca de El Caracol, donde en septiembre de 2004 se instaló la primera estación hidroclimatológica de diseño del Instituto, la cual debía integrarse con equipos e instrumentos ya plenamente probados y disponibles en el mercado, y operar en forma automática y desatendida, con mínimos requerimientos de mantenimiento y bajo consumo eléctrico a ser proporcionado por un panel solar. Para la teletransmisión de los datos se analizaron varias opciones, de entre las cuales se tomó la vía satelital como la alternativa más conveniente tomando en cuenta la posibilidad, con base en la operación exitosa de esta primera instalación, de implementar posteriormente un número mayor de estaciones con características similares. La integración física de esta primera estación no representó mayores problemas, ni tampoco su habilitación para operar en forma automática y desatendida con base en la energía solar. Pero la transmisión de datos vía satélite requirió de la identificación y adaptación de tecnologías que permitieran la intercomunicación entre el satélite y el sistema de adquisición de datos de la estación.

A la fecha, esta experiencia exitosa se ha replicado a lo largo y ancho del país en 108 estaciones hidroclimatológicas de las cuencas donde se ubican las principales centrales hidroeléctricas de la CFE, como la Angostura, Chicoasén, Malpaso, Peñitas, Infiernillo, Caracol y Mazatepec. También se incluyen sitios en las cuencas de los ríos Fuerte, Yaqui y Santiago,

con sus respectivas presas, así como en las presas de Temascal, Bacurato, Comedero, Humaya, Mocúzari y Sanalona. De esta forma, el monitoreo de las estaciones se realiza en forma *cuasi-real* a través de un sistema comercial de satélites, y la información obtenida se envía cada hora en forma automática a servidores donde es integrada a las bases de datos cuyo manejo y presentación en forma tabular y gráfica sobre mapas de las cuencas se realiza mediante herramientas computacionales desarrolladas en la GER-IIE, en un sitio *web* construido específicamente con tal propósito. Esto permite a usuarios autorizados, como el CENACE, la Gerencia de Ingeniería Civil, las Divisiones Hidrométricas y las diferentes Centrales Hidroeléctricas, obtener vía Internet, o por la Intranet de la Comisión, información en forma gráfica y tabular de períodos diarios, semanales, mensuales o definidos por el usuario. También a través de este sitio *web* es posible revisar la información de cualquier otro período. Los datos pueden ser recuperados y guardados para su posterior procesamiento por parte de los usuarios.

En el sitio *web* creado en este proyecto las estaciones hidroclimatológicas, organizadas por cuenca, son presentadas al usuario mediante una interfaz en un mapa interactivo con ligas hacia la información detallada de las mismas. El usuario puede entonces seleccionar la cuenca y posteriormente la estación que desea consultar. El sitio *web* también permite la revisión de la información por cuenca hidrológica, presentando el resumen con la última información horaria o de las horas previas (hasta 24 horas). Ante la presencia de eventos críticos, como lluvias excesivas, niveles críticos en presas y ríos, etc., el sistema envía automáticamente alertas por correo electrónico para que los usuarios responsables puedan tomar las medidas necesarias. Gracias al trabajo realizado por la Gerencia de Sistemas Informáticos del IIE, la información contenida en el sitio *web* puede ser ahora consultada mediante dispositivos móviles, lo que permite la toma oportuna de decisiones y una mejor gestión de los embalses.

Más allá de los ahorros económicos resultantes de la mejora en los procedimientos, y de la oportunidad y confiabilidad de la información ahora disponible, el siguiente caso sirve para ilustrar otros beneficios derivados de esta innovación introducida por la GER-IIE. Las fuertes lluvias acaecidas en el sur del país en noviembre de 2007 tuvieron como resultado serios deslaves de los taludes de algunos cerros, uno de los cuales ocurrió precisamente sobre el río Grijalva con el consecuente taponamiento de su cauce y el inevitable incremento en el nivel de las aguas río arriba,



inundaciones y otros daños a las comunidades ribereñas. Conforme se acumulaba el agua por el taponamiento el riesgo inminente era la ruptura del tapón y la súbita descarga de millones de toneladas de agua que seguramente arrasaría con todo a su paso. Para los técnicos de la CFE encargados de aliviar la situación se hizo entonces urgente conocer con precisión la rapidez con que se incrementaba el nivel de las aguas antes del tapón, por lo que decidieron solicitar el apoyo del Instituto para que instalara, antes y después del tapón, estaciones de medición para registrar, entre otras cosas, las variaciones de niveles durante el curso de los eventos. Así se hizo y, gracias a las estaciones instaladas, tanto los técnicos que se encontraban operando en sitio como los funcionarios de la CFE y de los gobiernos involucrados, ubicados en otras partes del país, pudieron atestiguar la forma como se detuvo el incremento del nivel del agua y cómo fue disminuyendo conforme se aplicaban las medidas adecuadas para remover el tapón.

Tanto los equipos como los medios de transmisión de datos integrados en las primeras estaciones hidroclimatológicas instaladas como parte de este programa fueron adquiridos en el mercado nacional e internacional. Pero conforme crecía el uso y entendimiento de esta tecnología, se hizo posible remplazar algunos elementos, principalmente por el lado del *software*, con desarrollos propios. Con ello ahora el IIE cuenta con tecnología que le permite dar seguimiento en forma automática a la operación de sistemas remotos, principalmente a instalaciones especializadas para la evaluación de los recursos energéticos renovables del país.

Energía del océano

Poco se ha hecho en el Instituto en torno a la evaluación del recurso energético del océano mexicano. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) México cuenta con 11,122 kilómetros de litorales exclusivamente continentales, los que cuentan con cantidades impresionantes de energía renovable contenidas en las olas, las mareas, las corrientes marinas, los gradientes térmicos, y los gradientes de salinidad en la desembocadura de los ríos. La tarea de evaluar y caracterizar estos recursos rebasa con mucho las capacidades existentes en el IIE, e incluso las existentes en instituciones especializadas en la oceanografía, que poco han incursionado en los temas energéticos.

Como parte de las labores del Laboratorio Nacional para la Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables en México, en la GER-IIE se hizo un intento por identificar y conocer la información existente sobre la energía aprovechable del mar en México, pero salvo en el caso de las mareas que aparentemente es el fenómeno más estudiado por los investigadores en la materia, poca es la información disponible sobre las otras formas de energía oceánica.

Según los estándares existentes y los expertos internacionales en el tema, el aprovechamiento de la energía de mareas es solo posible en lugares con una diferencia de, al menos, 5 m entre marea alta y baja. En general se ha encontrado que la diferencia en los niveles de las mareas en los litorales mexicanos es relativamente pequeña, pero hay algunos sitios que podrían ser apropiados para extraer la energía ahí disponible, como es el caso de Puerto Peñasco en el Estado de Sonora, que tiene una diferencia promedio anual en sus niveles de marea del orden de ocho metros.

La GER-IIE ha establecido vínculos con grupos universitarios para instalar instrumentos, propiedad del IIE, en algunos puntos del litoral mexicano donde las corrientes marinas parecen ser atractivas para recuperar energía, pero también con la finalidad de establecer métodos de instalación del equipo, recolección y procesamiento de datos. Esto es solo el principio de un largo camino para tener información útil para dar impulso al desarrollo de proyectos con estos recursos.

LERM

La evaluación de los recursos energéticos renovables de un país podría en principio ser considerada como la puesta en práctica de una técnica ya bien establecida, pero en el fondo no es así. Se trata en realidad de un trabajo científico cuyo método todavía está en evolución, lo que ayuda a explicar las diferencias que hay en los valores que distintos investigadores reportan sobre el potencial de un determinado recurso, por ejemplo el viento, y el vacío de información existente relacionada con las variaciones en el tiempo de los principales parámetros que caracterizan ese recurso; variaciones de corto, muy corto, mediano y largo plazos. Con todo y ello, en la práctica empresarial actual los desarrolladores de proyectos recurren a la información existente sobre el valor de los recursos para sus propósitos, siempre y cuando con dicha información el proyecto muestre márgenes adecuados de rentabilidad económica. Desde luego, el costo de oportunidad es un factor que también entra en juego, pero el proyecto resultante puede no ser necesariamente la mejor forma de explotar el recurso. Por ejemplo, en el caso de La Ventosa, se tienen proyectos cuya rentabilidad económica es aceptable para los inversionistas, pero que no necesariamente utilizan el recurso viento de la manera más eficiente y sostenible, en buena me-



didada por falta de información sobre las particularidades de este recurso en el sitio.

En otras ramas de la ciencia los científicos recurren a experimentos de laboratorio para encontrar respuestas a las incógnitas que su proyecto plantea. Considerando esta buena práctica, en la GER-IIE surgió la idea de crear un laboratorio para evaluar los recursos energéticos renovables del país. Y atendiendo a la convocatoria de CONACYT “Apoyos Complementarios para el Establecimiento de Laboratorios Nacionales de Infraestructura Científica o Desarrollo Tecnológico 2006”, en el año 2007 el IIE presentó una propuesta para crear el “Laboratorio Nacional para la Evaluación de los Recursos Energéticos Renovables en México” (LERM), proyecto que fue aprobado con un presupuesto para tres años mediante un esquema bipartita en el cual 50% de los fondos fueron aportados por CONACYT y el otro 50% por el Fideicomiso para Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (FICYDET) del Instituto.

Para algunos la idea de un laboratorio de esta naturaleza ha parecido muy extraña, pues poco parece tener en común con el concepto tradicional de un laboratorio en el que un conjunto de equipos e instrumentos especializados se hallan confinados en un edificio en el que trabajan los investigadores. Pero en el caso del LERM, el laboratorio está constituido por los más de dos millones de kilómetros cuadrados del territorio nacional y su mar patrimonial, en el cual trabajan los investigadores. Los equipos e instrumentos se llevan e instalan en los sitios donde se han de hacer las mediciones que permitan evaluar y caracterizar los recursos de interés. Vender la idea a los evaluadores CONACYT no fue fácil; hacerla trascender en el ámbito de las autoridades responsables de elaborar el inventario nacional de los recursos energéticos renovables del país, tampoco lo ha sido. Pero se ha trabajado con resultados útiles y satisfactorios.



El LERM inició operaciones en el año 2008, con el objetivo general de desarrollar una plataforma tecnológica y crear infraestructura que permitiera la integración de bases de datos confiables sobre los recursos energéticos renovables del país, lo que debería posibilitar la elaboración de la cartografía necesaria para las actividades de planeación y desarrollo de proyectos para el aprovechamiento de tales recursos. En la propuesta se

plantearon además varios objetivos específicos, tales como contar con el equipo necesario para realizar campañas de medición en áreas de interés donde existiera la posibilidad de aprovechar el potencial de los recursos energéticos renovables con fines productivos, elaborar metodologías para la evaluación de los potenciales energéticos de esos recursos, consolidar bases de datos con información confiable, y formar recursos humanos especializados en el tema. Objetivos demasiado ambiciosos si se considera lo limitado del tiempo y de los recursos económicos aprobados, pero que reflejan la preocupación institucional ante la magnitud del reto. Este primer paso ha permitido adquirir equipo de medición especializado, *software* también especializado para el procesamiento de datos, equipo de cómputo y servidores electrónicos para el manejo, almacenamiento e intercambio de información, así como documentación de soporte.



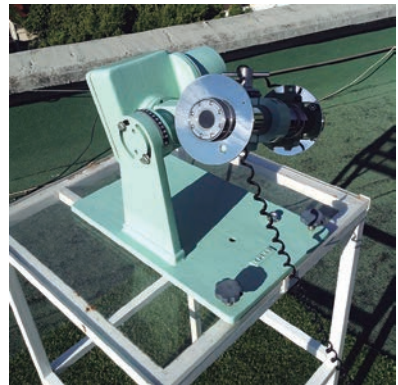
La propuesta del IIE fue apoyada por varias instituciones, incluyendo el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), la CONUEE y las universidades Autónoma de Baja California, Colima, Sonora, Autónoma de Zacatecas, Veracruzana, y Nacional Autónoma de México (UNAM, a través de los centros de Investigación en Energía y en Ecosistemas, y los institutos de Geofísica y de Ingeniería). Otras más se han unido en el camino, por lo que actualmente el LERM cuenta con 24 instituciones asociadas en todo el país¹, las cuales conforman una red dedicada al monitoreo, medición y evaluación de los recursos energéticos renovables en México. Las acciones que se llevan a cabo en el seno de esta red están enmarcadas en convenios

¹ Instituciones que forman parte de la red del LERM: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Centro de Cambio Global y de Sustentabilidad del Sureste, Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Universidad Autónoma de Baja California Sur, *General Electric*, Gobierno del Estado de Morelos, Instituto de Geofísica UNAM, Instituto Tecnológico de Chihuahua, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Instituto Tecnológico Superior de Perote, Universidad Autónoma de Baja California, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Universidad Autónoma de Guadalajara, Universidad Autónoma de Nayarit, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Universidad de Colima, Universidad de Guadalajara, Universidad Autónoma de Yucatán, Universidad de Sonora, Universidad del Caribe, Universidad del Istmo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Politécnica del Estado de Guerrero, Universidad Técnica de Chihuahua, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Veracruzana.

de colaboración entre cada una de las instituciones y el Instituto. Ello permite que cada institución tenga acceso a los equipos e instrumentos que requiere para sus investigaciones y para la formación de recursos humanos especializados. La integración formal de esta red de instituciones ha sido sin duda alguna el principal logro del IIE en el marco del LERM, pues en ella se conjugan las voluntades de los principales talentos del país interesados en este tema.

Otros resultados obtenidos en el LERM ya han sido referidos en párrafos anteriores, incluyendo la red de estaciones anemo-solarimétricas instaladas en más de 30 sitios y los mapas nacionales de los recursos solar y eólico presentados por el Presidente de la República en la COP-16. Las instituciones académicas integrantes del LERM han formado especialistas a nivel licenciatura y posgrado, y continúan con sus actividades de monitoreo y evaluación de los recursos. El LERM cuenta con un sitio *web* que ofrece información sobre los recursos energéticos renovables de México. Esta información se actualiza conforme se obtiene de los instrumentos instalados en campo. Ya se cuentan en miles las consultas que hacen en este sitio *web* usuarios nacionales y de otras partes del mundo.

¿Qué permite a la industria petrolera hablar de reservas probadas, probables, inferidas, etc.? Ciertamente hay reglas establecidas por consenso en la industria, las cuales fijan los criterios que debe cumplir un recurso para su categorización. Para las energías renovables, aún a nivel internacional, los criterios no están bien establecidos en todos los casos. Por ejemplo, en cuanto a la energía eólica, hace 15 años un conjunto de centros de pruebas eólicas tomó la iniciativa de desarrollar estándares de medición para asegurar la calidad de la información sobre este recurso, lo que ha dado origen a varias recomendaciones, estándares y requerimientos para los procedimientos de medición de la velocidad del viento y del desempeño de los sistemas eólicos. Así, bajo los auspicios de la Comisión Europea, se creó la red MEASNET que se ha convertido en la organización de referencia en lo que a calidad de mediciones eólicas se refiere. El Instituto no es miembro de la red MEASNET, pero ha adoptado para



su trabajo las mejores prácticas establecidas por ese organismo, mismas que se difunden a nivel nacional a través de las instituciones afiliadas al LERM. En el caso de otros recursos de energías renovables, el IIE ha desarrollado sus propios métodos para la evaluación de los potenciales, los cuales están siendo contrastados con los métodos desarrollados por otras instituciones, nacionales e internacionales.

SIGER

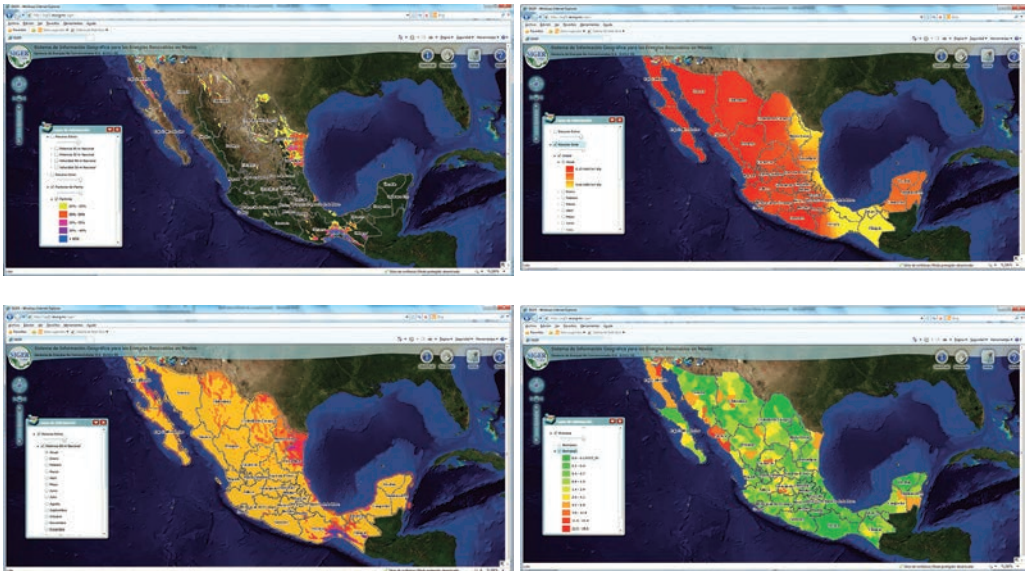
Uno de los mayores retos que ha enfrentado la CFE desde su creación ha sido dotar del servicio eléctrico a comunidades rurales lejanas, más allá de donde es técnica y económicamente factible extender sus redes. Aún hoy en día cerca de 3 millones de mexicanos carecen del servicio eléctrico por red a pesar del avance económico del país. En algunos casos la necesidad ha sido atendida por medio de grupos electrógenos a diésel con el alto costo de operación y los impactos ambientales que ello implica; en otros casos se ha dotado con pequeños paneles fotovoltaicos a los usuarios. Sin lugar a dudas, todas las localidades aún no servidas cuentan con recursos energéticos renovables que son suficientes para la generación local de electricidad. Y desde luego, existen tecnologías aptas para su aprovechamiento. Con el avance de las tecnologías habilitadoras, la informática y otros medios modernos, es posible ya visualizar de manera realista esquemas en donde las comunidades remotas puedan tener ahora servicio eléctrico en condiciones análogas al del medio urbano, y a costos competitivos, por medio de microrredes alimentadas con varios recursos energéticos renovables locales en esquemas conocidos como **sistemas híbridos**, y soportadas por tecnologías avanzadas.

La implementación de tales esquemas requiere de gran cantidad de información sobre los recursos, energéticos y de otra índole, disponibles localmente, juntamente con información sobre el microclima de la localidad, la topografía del terreno, la ubicación geográfica de la comunidad, su entorno y su demografía, las características y costos de las tecnologías, etc. Los sistemas informáticos modernos nos permiten manejar en forma ágil toda esa información y mediante el uso de modelos cartográficos es posible identificar las mejores opciones para atender problemas como el de la electrificación rural. La GER-IIE incursionó en el campo de los sistemas de información geográfica (SIG) en 1997 y desde entonces ha venido trabajando con estas técnicas hacia la consolidación de lo que ahora se conoce como el SIGER (Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables). Este es un sistema compuesto por mapas en formatos raster y vectorial, y datos en forma tabular, los cuales contienen información sobre las energías renovables y de aquellos elementos geográficos que influyen en la determinación de sitios para el aprove-



chamamiento de estas fuentes de energía. La información más importante con la que cuenta son los mapas de la distribución de los potenciales de las energías renovables. También posee información de utilidad para la determinación de estos potenciales y aquella necesaria para la estimación de costos de generación eléctrica o de la viabilidad técnica de proyectos. El sistema geográfico empleado actualmente es el estándar utilizado por el INEGI en la cartografía.

El SIGER tiene un elemento fundamental para la difusión de los resultados: el servidor de mapas dinámicos. Este servidor integra mapas de las diferentes fuentes de energía acopladas con capas base que le permiten al usuario tener una idea general de cómo y dónde se encuentran las zonas con mayores potenciales. El SIGER cuenta con la cartografía más reciente de la evaluación de los recursos y se actualiza con cierta regularidad, por lo que es un buen referente del potencial de los recursos energéticos renovables.



Biomasa

La materia orgánica de origen vegetal que ahora llamamos biomasa ha sido un recurso valioso para la humanidad desde que el hombre primitivo descubrió cómo controlar y usar el fuego con fines prácticos para su beneficio: calentar su morada, iluminar la oscuridad de las noches, protegerse contra los animales salvajes, cocer sus alimentos. La combustión de biomasa, principalmente en forma de leña, fue por muchos años la principal forma de energía utilizada en los hogares y en procesos industriales, hasta el advenimiento de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y sus derivados. Muchos de estos usos prevalecen aún hoy en día, principalmente en las zonas rurales de los países menos desarrollados donde la leña continúa siendo el principal energético. Según el Consejo Mundial de la Energía, la biomasa aporta cerca del 10% del consumo anual de energía primaria en el mundo y pronostica que su uso seguirá creciendo y podría llegar a contribuir entre 25% y 30% de la mezcla futura de energía.

La biomasa es uno de los recursos renovables más abundantes en México, gracias a la variedad de climas y a la vocación agrícola y pecuaria del campo mexicano. Desde el punto de vista energético, la biomasa es energía solar convertida en materia orgánica por medio del proceso fotosintético, parte de la cual cumple su ciclo en la cadena alimenticia de los humanos y de los animales, para manifestarse posteriormente en formas



alternativas. Es así como en la actualidad el concepto de biomasa incluye a las excretas, los residuos agrícolas, la leña, los residuos de la actividad maderera tanto en los bosques como en los aserraderos, los residuos agrícolas, e inclusive los residuos sólidos urbanos, de los cuales se puede rescatar su contenido energético con propósitos prácticos. El concepto de biomasa incluye también aquellos cultivos de especies vegetales cuyo propósito directo es el suministro energético para las actividades humanas, tales como las plantaciones de árboles de rápido crecimiento o los cultivos de algas marinas o de agua dulce.

En México la biomasa aporta poco más del 4% del total de la energía primaria, siendo la madera forestal en forma de leña y carbón vegetal los recursos básicos. Se estima un consumo de 38 millones de metros cúbicos de madera al año para fines energéticos, tres y media veces superior al uso de madera en rollo en las industrias del papel, muebles, y la construcción. Cerca del 66% de la biomasa como energía se destina al sector doméstico de autoconsumo y alrededor del 2% para producir carbón vegetal que se consume principalmente en zonas urbanas.

La biomasa es versátil como energético, pues a partir de ella se pueden obtener combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Los procesos para su conversión son bien conocidos y, en algunas partes del mundo, se aplican con cierta regularidad. La historia mundial del uso de combustibles derivados de la biomasa es larga y con variedad de aplicaciones. En la época en que se creó el Instituto, la India y China eran los países con mayor tradición en el uso de **biodigestores**, también conocidos como **digestores anaerobios**, tecnologías destinadas a la producción de **biogás**, un gas combustible similar al gas natural, a partir de estiércol de ganado vacuno y porcino. Ambos países habían desarrollado tecnología con características propias, que llegó a ser conocida en el mundo en forma genérica como digestores tipo chino y digestores tipo hindú. Se tenía noticia además de que en ambos países la aplicación de estas tecnologías se daba en escala masiva, con la activa participación de los usuarios, pues ello es indispensable para la sustentabilidad de las aplicaciones en pequeña escala de esta tecnología.



El Biogás en el IIE

Biodigestores

La similitud en cuanto al nivel de desarrollo de las zonas rurales de México con las de India y China llevó a pensar que los biodigestores podían ser también una buena alternativa para el suministro de energía en comunidades rurales de nuestro país, como medio para abatir el consumo de leña y proteger los bosques. Bajo tal premisa, en el IIE se iniciaron los trabajos para descifrar cómo se produce el biogás a partir de desechos orgánicos con propósitos de desarrollar localmente la tecnología de biodigestores. Estos trabajos, pioneros en el país, se llevaron a cabo durante la segunda mitad de la década de 1970 y hasta mediados de la década siguiente. No se hizo necesario el uso de grandes y sofisticados laboratorios: bastó para ello el uso de garrafas y bidones en los que se llevaban a cabo las reacciones, y cámaras para llantas de auto que servían para almacenar el gas. De ahí se pasó a la construcción de los primeros biodigestores en campo, como parte del proyecto de sistemas energéticos integrales. De esta forma tuvo lugar el desarrollo de procesos, metodologías y sistemas de biodigestión para la aplicación de la tecnología en el medio rural, agroindustrial y urbano.

En las actividades para el desarrollo de la tecnología de biodigestores en el Instituto destacó el liderazgo de la Maestra Ana María Martínez



Leal, primera jefa del Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía (ahora Gerencia de Energías Renovables) y a cuya memoria se dedica este libro, quien hasta el año de su muerte en 1995, dirigió a un grupo de entusiastas investigadores que mediante trabajo en laboratorio y en campo sentaron las bases de esta tecnología en México. De esta labor destacan resultados como la determinación del porcentaje óptimo de sólidos en la alimentación al digestor, la relación precisa de nitrógeno y carbono en la mezcla de nutrientes, y la influencia de la temperatura en la digestión de desechos orgánicos, así como los principios para el diseño, construcción y determinación de costos de digestores para uso familiar.

A lo largo de ese período y con base en los trabajos experimentales llevados a cabo en el IIE, se construyeron digestores piloto-demostrativos con capacidades de 4 m³ a 40 m³ de biogás, para ser alimentados con excretas de ganado bovino, porcino o de aves. Estos digestores fueron construidos para uso doméstico o de pequeñas granjas en comunidades rurales del Estado de Morelos, a fin de estudiar los factores humanos y sociales involucrados en la autoconstrucción y operación de esta tecnología, y derivar lecciones para su eventual aplicación masiva. Los digestores de mayor capacidad, construidos en granjas de explotación intensiva, tuvieron el objetivo no solamente de generar energía sino también de mitigar de manera importante la contaminación causada por estos residuos orgánicos en la granja y sus alrededores.



El propósito último de estos trabajos era que los biodigestores se aplicaran en forma masiva en el país mediante programas gubernamentales o de organismos de asistencia para el desarrollo. Con ese propósito, una vez probada y afinada la tecnología, las experiencias fueron documentadas en manuales y guías de usuario que tuvieron una gran difusión en toda América Latina, gracias al apoyo de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Las especificaciones constructivas y de operación fueron también integradas en paquetes tecnológicos listos para la transferencia a las entidades usuarias. En el proceso de prueba y ajuste de la tecnología se demostraron las aplicaciones del biogás para cocción de alimentos, en el caso de los digestores domiciliarios, y para la generación eléctrica en el caso del digestor de 40 m³ que se construyó en la escuela agropecuaria del poblado de Xoxocotla en Morelos.



La producción de biogás mediante el proceso de biodigestión deja un remanente conocido como **lodo residual**, cuya composición química lo hace útil como abono y acondicionador de suelos. Esto fue también demostrado en el curso de las investigaciones del Instituto mediante cultivos de hortalizas de gran rendimiento, técnica que el día de hoy está muy de moda en los llamados productos orgánicos. El digester construido en Xoxocotla fue el primero en México que operaba en forma continua, ya que permitía recuperar los “lodos” sin detener el proceso de biodigestión, a diferencia de los más pequeños del tipo chino e hindú para aplicaciones domésticas, que operaban en forma intermitente dada la necesidad de interrumpir el proceso para destapar el biodigestor a fin de remover los “lodos” residuales, y luego cargar nuevamente el digester con biomasa fresca.

Las investigaciones del IIE en este tema llegaron a su término sin que la tecnología tuviera la difusión esperada. Por un lado, los campesinos en la región piloto no se mostraron dispuestos a adoptar la tecnología, aparentemente por las implicaciones inherentes a la recolección y manejo de las excretas animales, o del cambio en el uso tradicional consistente en incorporar las excretas directamente al suelo “para mejorar la tierra”, o bien por el trabajo extra que implican las labores de limpieza periódica del digester. También se registraron factores culturales, como la renuencia a utilizar un gas proveniente de excretas para la cocción de sus alimentos. Por otro lado, los organismos responsables del desarrollo rural no mostraron mayor interés en establecer programas para la difusión de la tecnología. Tuvieron que pasar casi 25 años para que los biodigestores hicieran su aparición de manera más o menos sistemática en el campo mexicano,

mas no precisamente por razones de suministro energético para mejorar la calidad de vida en el medio rural sino por cuestiones ambientales.

En la actualidad, los digestores anaerobios de excretas animales empiezan a tener aplicación en México, principalmente en las operaciones de mayor volumen, como es el caso de las grandes granjas porcinas y de ganado vacuno estabulado. El proceso bacteriano que ocurre en los digestores emula lo que ocurre de manera espontánea en la naturaleza cuando se dan las condiciones necesarias. Por ello, las excretas depositadas en simples fosas a cielo abierto, práctica común en muchas granjas del país, producen metano (principal componente del biogás), gas con efecto invernadero cuyo poder contaminante es 21 veces mayor que el del bióxido de carbono que se desprende de la quema de combustibles fósiles. Por ello, una vez que en México se implementaron los instrumentos del Mecanismo del Desarrollo Limpio (más conocido como MDL), derivados del Protocolo de Kyoto, las empresas comercializadoras de los llamados Bonos de Carbono establecieron operaciones en nuestro país para adquirir los derechos de reducción de emisiones de CO₂ y otros gases con efecto invernadero en los principales puntos de generación. De ahí que se multiplicara la instalación de biodigestores de baja tecnología cuyo único propósito ha sido controlar la producción de metano para destruirlo quemándolo sin aprovechar su energía. A últimas fechas, esta práctica parece evolucionar hacia la generación eléctrica como lo demuestran los grandes biodigestores que se construyen en Ciudad Lerdo, Durango, y Atlacomulco, Estado de México.



Tratamiento de aguas

Las plantas convencionales para el tratamiento de aguas residuales municipales presentan típicamente dos problemas que demandan soluciones alternativas: su alto consumo de electricidad y la producción de lodos residuales, que a su vez requieren ser tratados para evitar problemas de salud y contaminación, lo que implica en muchos casos la construcción de plantas adicionales para estabilizarlos mediante el uso de productos químicos y un mayor consumo eléctrico. En otros casos se utilizan biodigestores para este propósito. A mediados de la década de 1980, expertos del área de biomasa de la GER-IIE, aplicando los conocimientos adquiridos previamente en los pequeños digestores, realizaron estudios y análisis sobre la cantidad y calidad del biogás generado por los siete digestores de más de 10 mil metros cúbicos, instalados para la estabilización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales conocida como Monterrey IV, en la zona conurbada de Monterrey, Nuevo León.



Las experiencias vividas en el campo del tratamiento de aguas residuales municipales llevaron a los investigadores del Instituto a reflexionar sobre las implicaciones que tendría sobre el sector eléctrico el que todas las aguas residuales del país fuesen tratadas por medios convencionales. La demanda eléctrica podría crecer de manera importante, pues en aquella época el porcentaje de aguas residuales tratadas a nivel nacional era muy bajo. Para atender esta situación, los especialistas de la

GER-IIE diseñaron un proceso anaerobio-aerobio-anóxico que se implementó como prueba piloto en la pequeña planta de tratamiento de aguas residuales del IIE, en reemplazo del esquema aerobio originalmente instalado. Los resultados obtenidos fueron alentadores, pues se logró reducir en un 50% el consumo de electricidad de la planta y prácticamente se eliminó la producción de lodos residuales, amén de una mejor calidad del agua descargada al río Apatlaco que bordea las instalaciones del Instituto en Cuernavaca. El esquema implementado también producía biogás, aunque en muy poca cantidad debido a la pequeña escala de esta prueba piloto. Sin embargo, en plantas de tratamiento de aguas residuales de mayor tamaño, la cantidad de biogás producido podría llegar a ser suficiente para autoabastecer el otro 50% de la electricidad que requiere el proceso, con lo que las plantas de tratamiento podrían llegar a ser autosuficientes desde el punto de vista eléctrico.

Con base en el éxito de esta prueba piloto, se convocó a las empresas que construyen plantas de tratamiento de aguas residuales en México y se les presentaron los resultados con la intención de que se interesaran en adoptar la tecnología. Sin embargo, no hubo respuesta, pues la mayoría de esas empresas son representantes de empresas extranjeras, por lo que no tienen la libertad de modificar sus procesos y, en el caso de las empresas independientes, son pocas las oportunidades que tienen de ganar concursos municipales frente a las otras más grandes. Con todo y ello, la tecnología representa una oportunidad para mejorar los aspectos ambientales de poblaciones pequeñas, sin que resulte en una carga económica onerosa.



Existen empresas en nuestro país que generan grandes cantidades de efluentes que llevan residuos orgánicos y que, en muchos casos, son descargados impunemente a los arroyos y cuerpos de agua cercanos, con la consecuente contaminación y eventual eutrofización de las aguas. Un caso en cuestión es la industria alcohólica que desecha grandes cantidades de vinazas que son un subproducto en la fermentación del mosto. Esta situación llevó a los investigadores del área de biomasa del IIE a desarrollar un proceso para el tratamiento de aguas residuales generadas en la producción del alcohol de los ingenios azucareros. En este caso se diseñaron reactores de laboratorio con el propósito de probar procesos alternativos para el tratamiento de estos efluentes, y determinar los parámetros que



permitieran su escalamiento a nivel de planta piloto-demostrativa. Los resultados obtenidos en el curso de estos experimentos fueron una alta producción de biogás, la neutralización y enfriamiento de las aguas tratadas, y la reducción de los efectos degradantes y contaminantes al medio ambiente. A pesar de las bondades del proceso, las empresas que podrían haber estado interesadas en su aplicación no respondieron favorablemente, en parte por los requerimientos de inversión para llevar la tecnología a la siguiente etapa de desarrollo, y en parte por la entonces laxa aplicación de las normas ambientales al permitir que esos contaminantes de alto impacto se pudieran descargar a los cuerpos de agua.



Ya entrada la década de 1990, se emprendieron trabajos para aplicar las capacidades de los especialistas en biomasa del Instituto para beneficio de otras ramas industriales. Tal es el caso de la industria del citrato de sodio, compuesto que tiene diversos usos en la industria médica y alimenticia, y en cuya fabricación se generan residuos que pueden recuperarse para la producción de energía, pero que en lugar de ello suelen desecharse en ríos y lagos sin tratamiento previo. El IIE

desarrolló un proceso de tratamiento cuyos trabajos se iniciaron a nivel de laboratorio, pues se buscaba primero entender los mecanismos para la separación de las fases acidogénica y metanogénica involucradas en el proceso anaerobio utilizado, a fin de hacer más eficientes los tiempos de residencia en el reactor. A partir de tales experimentos se logró establecer un nuevo proceso bioquímico de separación sin precedente en la literatura disponible en aquellos años. Lamentablemente, la falta de recursos económicos impidió que los trabajos pudieran continuar hacia las etapas de planta piloto e instalaciones demostrativas.

Del desarrollo a la promoción

Las experiencias vividas en el Instituto durante los intentos de introducir las tecnologías de biomasa desarrolladas localmente a lo largo de los años hicieron evidente la existencia de barreras técnicas y no técnicas que debían ser removidas a fin de lograr los objetivos planteados. Entre otras, la falta de conocimiento por parte de los usuarios potenciales sobre las tecnologías y sus ventajas comparativas, así como la falta de vínculos del IIE con las empresas que pudieran tomar la tecnología y llevarla al mercado. Es por ello que a partir del año 2000 se comenzó a poner énfasis en las actividades de promoción de las tecnologías en áreas de aplicación donde los resultados pudieran ser de mayor beneficio.

De basura a energía

Los residuos sólidos municipales, conocidos vulgarmente como “basura”, constituyen tal vez uno de los problemas ambientales y sociales más apremiantes de nuestro país, ya que en un porcentaje muy alto no son recolectados ni dispuestos adecuadamente. Representan no solo un problema de imagen, sino también de salud pública y de impacto negativo al medio ambiente. Por otro lado, la basura constituye una fuente de riqueza por la vía del reciclaje, y tiene un alto contenido energético que en otras latitudes es aprovechado para la generación de electricidad. Así,



mediante el esquema de autoabastecimiento eléctrico permitido por la Ley, los municipios pueden aprovechar este recurso y aliviar el problema financiero que les representan las facturas eléctricas por concepto de los servicios de alumbrado, bombeo de agua y otros servicios públicos.

Los llamados rellenos sanitarios son una opción viable para el manejo y la disposición final de residuos sólidos municipales. Tienen la desventaja en comparación con otras opciones de disposición final de requerir importantes áreas de terreno para su instalación, lo cual compite con los espacios urbanos que podrían ser utilizados con otros propósitos. Pero por otro lado, en ellos se produce biogás de manera espontánea que puede tener diversos usos, incluida la generación de electricidad. El primer proyecto demostrativo para tal fin en México fue realizado por investigadores de la GER-IIE en 1991 mediante la instalación y operación de una planta piloto en un relleno sanitario en la localidad de Santa Cruz Meyehualco, uno de los nueve sitios entonces existentes para la disposición final de basura en el Distrito Federal. Se trató de una planta con capacidad de 20 kW que fue instalada con la colaboración de personal de la ahora extinta Compañía de Luz y Fuerza del Centro, de la CFE y del Departamento del Distrito Federal.

Paralelamente se desarrollaron metodologías de laboratorio para la evaluación metanogénica de la basura, modelos matemáticos para predecir la producción de gas y energía de acuerdo con las características de los sitios, y técnicas para adaptar motores diésel para operar con biogás.



En cinco de los sitios estudiados en el Distrito Federal se identificó un potencial total de 26 MW, con costos de generación de entre 2 y 3 centavos de dólar por kWh. Posteriormente, en 1995 se hicieron estudios para estimar el potencial energético del relleno sanitario de Prados de la Montaña, ubicado en Santa Fe, Distrito Federal, y posteriormente el del relleno sanitario de Chiltepeque, en el Estado de Puebla.

La producción diaria nacional de basura en el año 2000 se estimaba en 84,200 toneladas, de las cuales solo el 53% se depositaban en 51 rellenos sanitarios ubicados en ciudades medias y zonas metropolitanas, y muy poco en localidades pequeñas. Esto representó en aquel tiempo un confinamiento anual en rellenos sanitarios de 16.3 millones de toneladas de basura. Se calculó entonces que con el biogás que produciría la basura confinada en los cinco años anteriores, sería posible soportar una capacidad de generación eléctrica cercana a los 80 MW, e incorporar 16 MW adicionales con la nueva basura que año con año se habría de acumular en los rellenos existentes. De esta forma, ya para el año 2010 la capacidad total de generación eléctrica con residuos sólidos municipales podría haber llegado a los 240 MW. En el caso ideal de que toda la basura entonces producida fuera confinada en rellenos sanitarios, la capacidad de generación eléctrica por medio del biogás resultante en todo el país podría haber llegado a los 400 MW. Conforme la población y la economía del país iban creciendo, esta capacidad podría también haber ido en aumento.

Con base en las cifras anteriores, en el año 2000 el Instituto llegó a un acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER) para impulsar en el país el aprovechamiento del biogás de rellenos sanitarios para generar electricidad. Los objetivos establecidos en ese acuerdo incluyeron promover la instalación y operación de una planta demostrativa con capacidad para generar al menos 1 MW de electricidad con el biogás de un relleno sanitario municipal, identificar las barreras que hasta entonces habían impedido el uso de esta tecnología en nuestro país y proponer acciones para removerlas, y difundir los resultados del proyecto demostrativo a fin de que la experiencia pudiera replicarse en otras localidades.

Como parte de las acciones ejecutadas dentro del acuerdo se realizó un estudio para identificar aquellos municipios con potencial para la ejecución del proyecto demostrativo. Los criterios utilizados en el estudio incluyeron el número de habitantes del municipio, la cantidad de basura

producida y los esquemas existentes para el manejo de la misma, las dimensiones y la edad de los rellenos, y las características constructivas del relleno. El estudio abarcó 17 municipios con ciudades de tamaño medio (población cercana a un millón de habitantes), de los cuales cinco fueron seleccionados para la siguiente etapa (Aguascalientes, Acapulco, Puebla, Tlalnepantla y Zapopan). Paralelamente se estudiaron los esquemas prácticos para que los municipios y los inversionistas pudieran formar una sociedad de autoabastecimiento de acuerdo al marco legal vigente. Para ello, se contactaron inversionistas y empresarios interesados en formar dicha sociedad.



Se efectuaron además los estudios de pre-factibilidad para cada uno de los cinco casos, habiéndose encontrado para todos ellos buenos márgenes de rentabilidad. Sin embargo, solamente en el municipio de Aguascalientes fue posible avanzar los trabajos de ingeniería para instalar la planta. Aun así, no fue sino hasta el año 2012 que se puso en operación por parte del Ayuntamiento de Aguascalientes una planta de generación de 2.7 MW de capacidad, cuya producción total de electricidad se alimenta actualmente a una planta armadora de automóviles ubicada en esa ciudad. Para entonces el acuerdo del IIE con la SENER ya había fenecido varios años atrás y los investigadores dedicaban sus esfuerzos al desarrollo de otros proyectos.

Casi al mismo tiempo que el Instituto emprendía sus trabajos de promoción para el aprovechamiento del biogás de rellenos sanitarios, la empresa Bioeléctrica de Monterrey, constituida con aportación del gobierno del Estado de Nuevo León y de un grupo privado, construyeron la primera planta de ese tipo en México. La participación de los investigadores de la GER-IIE se centró en la caracterización del biogás producido en el relleno sanitario de la zona conurbada de Monterrey, donde se localiza la planta de generación. El proyecto se materializó en 2003 con una capacidad de 7 MW y cuenta actualmente con 12 MW que mediante una interconexión con la red de la CFE alimenta varias cargas, incluyendo el alumbrado de varios de los municipios de la zona conurbada, el sistema de transporte eléctrico colectivo de Monterrey, y otros servicios municipales y estatales.

Muchos intentos se han hecho por parte del IIE para promover el uso de los residuos sólidos municipales para la producción de energía. En



el área de los rellenos sanitarios, el más significativo por las dimensiones del relleno y por su potencial para la producción de biogás, es el relleno sanitario del llamado Bordo Poniente en la Ciudad de México, uno de los más grandes del mundo. Como secuela de los trabajos pioneros realizados años atrás para la evaluación del potencial energético de los rellenos sanitarios de la ciudad, el Gobierno del Distrito Federal (DF, hoy Ciudad de México) contrató al Instituto para hacer la caracterización del biogás producido en la llamada 4ª etapa del relleno sanitario de Bordo Poniente, y calcular la cantidad de electricidad que podría generarse con ese biogás. Esta 4ª etapa del relleno sanitario ocupa una extensión de 371 hectáreas, en las cuales se han depositado más de 50 millones de toneladas de residuos sólidos. Los trabajos de caracterización del relleno se realizaron en 2008 y se encontró que con el biogás producido con la basura ahí confinada podría soportarse durante 20 años la operación de una planta eléctrica con capacidad de 62.5 MW. La relación contractual con el DF fue posteriormente ampliada para brindarle asesoría de parte de los expertos de la GER-IIE para elaborar los términos de referencia para licitar la construcción de la planta y seleccionar al ganador del contrato al término del proceso licitatorio. El contrato para la construcción de la planta fue finalmente otorgado a una empresa nacional, pero 7 años después de que se realizaron los trabajos para la caracterización del sitio, aún no se han iniciado las obras para la construcción de la planta de generación de Bordo Poniente, aparentemente por problemas administrativos al paso de una administración a la siguiente.

Varias son las lecciones que se han asimilado a lo largo de los años dedicados a la promoción de la tecnología del biogás. La información recabada en campo indica que en general el uso del biogás de rellenos sanitarios municipales podría darse con plantas de generación relativamente pequeñas (de 20 MW o menos cada una), y muy adecuadas para el autoabastecimiento eléctrico municipal o la pequeña generación, pero la falta de financiamiento se ha identificado como una limitante seria, dada en buena medida por el dudoso historial crediticio de muchos municipios. En ciertos casos esta limitación se conjugó con la resistencia de las empresas concesionarias de los rellenos sanitarios (modelo muy en boga en el país) a modificar su esquema de concesión para permitir la generación de electricidad; en otros, el cambio de autoridades municipales fue motivo para que el proyecto se detuviera.

Entre las barreras que han impedido la aplicación de esta tecnología en nuestro país, se ubican el poco tiempo que dura la gestión de los gobiernos municipales en comparación con el tiempo requerido para el desarrollo de estos proyectos, la laxa aplicación de las leyes de protección al medio ambiente en materia de emisiones de rellenos sanitarios, el desconocimiento de las oportunidades y beneficios que ofrece la generación eléctrica con el biogás de los rellenos sanitarios, la poca claridad en los esquemas de asociación entre los municipios y los inversionistas privados para formar sociedades de autogeneración, y la falta de incentivos para su asociación. Además, la información sobre la cantidad y características de los rellenos sanitarios y sitios de disposición final en nuestro país sigue siendo escasa, la complicada tramitología para formalización de los proyectos, el riesgo para los inversionistas alto, y no se cuenta con programas oficiales que faciliten e impulsen la implantación de los proyectos.

Como parte de las tareas de esta línea de investigación relacionada con la producción de electricidad con el biogás generado en los rellenos sanitarios, se elaboraron metodologías para el desarrollo de proyectos y, en forma paralela, se organizaron dos coloquios internacionales con el propósito de dar a conocer estas opciones tecnológicas a la comunidad en general y a los inversionistas interesados en desarrollar proyectos en nuestro país, además de identificar las barreras para la implementación de este tipo de proyectos.

El primero evento se efectuó en la Ciudad de Aguascalientes en octubre del año 2002, y su éxito se debió en gran medida al involucramiento de funcionarios del H. Ayuntamiento de Aguascalientes y al apoyo de la

SENER. Al coloquio asistieron más de 150 delegados, procedentes de Estados Unidos, Canadá, España, Reino Unido y Colombia; funcionarios de municipios de gran parte del país; así como de organismos nacionales e internacionales, incluyendo el Banco Mundial, las agencias norteamericanas para la Protección Ambiental y para el Desarrollo Internacional. También asistieron representantes de la Embajada de Canadá en México y de empresas del ramo. En el evento se reconocieron los beneficios ambientales que ofrece esta tecnología, así como la existencia de barreras de orden institucional, político y económico que deben ser removidas para aprovechar los beneficios que ofrece la tecnología. El segundo coloquio se realizó en febrero de 2004 en la Ciudad de Monterrey. Este evento se llevó a cabo gracias al apoyo de Banobras, el Instituto Tecnológico de Monterrey, SEISA la empresa que instaló en esa ciudad la planta de generación antes mencionada, así como de varios organismos nacionales e internacionales en lo que se refiere a participación y difusión del evento. Este evento fue igualmente relevante, con una nutrida participación, pero se mostraron pocos avances en relación con lo analizado en el primer coloquio.

Estos eventos sirvieron de marco para difundir los conocimientos del IIE en el tema y para dar a conocer las herramientas computacionales aquí desarrolladas, basadas en el modelo conocido como Modelo de Decaimiento Exponencial de Primer Orden, y que sirven para estimar la producción de biogás de la basura confinada en rellenos sanitarios, evaluar su potencial energético, determinar la factibilidad técnica y económica de los rellenos sanitarios como fuente de energía, y valorar los beneficios ambientales que representa la recuperación y aprovechamiento del biogás. Con esta herramienta llamada PIETERS se ha evaluado el potencial de varios rellenos sanitarios del país, y es utilizada en forma paralela con el modelo “E-Plus” de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), ya que contiene parámetros de evaluación económica típicos para México, así como parámetros de ajuste técnico para la concentración de la composición de biogás y un módulo para el cálculo del radio de influencia para la construcción de pozos de extracción de gas. Sin embargo, a once años de distancia de haberse celebrado el segundo coloquio, los avances en este campo siguen siendo relativamente pocos.



El conocimiento generado en el Instituto sobre el tema de fuentes emisoras de biogás ha sido de utilidad a las agencias nacionales, encabeza-

das por el Instituto Nacional de Ecología (ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) responsable de integrar los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. La aportación del IIE corresponde al inventario del metano emitido por los desechos municipales, tanto líquidos como sólidos. Estos inventarios han formado parte de las Comunicaciones Nacionales que nuestro país presenta periódicamente a los organismos internacionales competentes para cumplir sus compromisos dentro del Protocolo de Kioto suscrito por el Gobierno Mexicano.



En el año 2005, la SENER a través de la Comisión Nacional de Ahorro de Energía, reconoció la labor del IIE relativa a la promoción del uso de biogás de rellenos sanitarios para generar electricidad, y le otorgó el 2º Lugar en la Categoría de Promoción, de los Premios Nacionales de Ahorro de Energía y Energía Renovable, reconocimiento simbólico que trae a la memoria el esfuerzo del personal ausente que estableció las bases del desarrollo de esta línea de investigación, y que habla de la entrega y sacrificio del personal que labora en ésta área, en contacto directo con los desechos, ya que los residuos, basura y excretas, son considerados por sus características físicas como productos repugnantes.

Incineración de basura

Aparte de la problemática asociada con la disponibilidad de terrenos para la disposición final de la basura, los rellenos sanitarios representan riesgos ambientales importantes cuando no son construidos con estricto apego a las normas internacionales establecidas. Entre otros, la contaminación de los mantos freáticos con los lixiviados que se derivan de la materia orgánica confinada en el relleno, la emisión de metano a la atmósfera y la potencial auto-ignición del mismo, que con frecuencia causa graves incendios altamente contaminantes. Por estas y otras razones, los rellenos sanitarios han caído en desuso en los países avanzados, y en su lugar se utilizan tecnologías de conversión térmica de los residuos sólidos municipales, tales como la incineración, la gasificación, la pirolisis y el plasma. Lamentablemente, en México la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética excluyó de forma explícita estas tecnologías de la definición de energías renovable, en virtud de su potencial liberación de gases contaminantes

cuando el proceso no es del todo eficiente. Sin embargo, la experiencia de otros países demuestra que esto se puede evitar recurriendo al uso de las buenas prácticas internacionales.

Sobre este tema los investigadores de la GER-IIE han realizado estudios sobre el estado que actualmente guardan las distintas tecnologías, y han llevado a cabo estudios de valorización energética de la basura de varios municipios para convertirla en electricidad por medio de procesos térmicos. Estos estudios han dado pie al desarrollo de metodologías para la evaluación de proyectos y tecnologías para producir energía a partir de la basura. En algunos casos la GER-IIE se desempeñó como asesor tecnológico contratado por Banobras para tal fin, y bajo contrato con la CFE en el año 2012 se elaboró la Guía de Usuario: “Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos”, en la que se proporciona información útil para el desarrollo de proyectos de esta naturaleza, tal como lineamientos para la selección de la tecnología idónea, lineamientos para identificar el portafolio y récord de operación de los proveedores de tecnología, métodos para realizar los estudios de factibilidad técnica y económica, así como lo relacionado con la gestión de permisos y trámites ante la autoridad.

Jatropha curcas

En el año 2006 el CONACYT lanzó una convocatoria para la “presentación de ideas para la realización de *megaproyectos* de investigación científica y tecnológica”, con presupuesto de “hasta mil millones de pesos”, a la cual la GER-IIE respondió con la propuesta “Cadena Integral de Biodiesel con Especies Nativas Mexicanas” cuyo objetivo era crear los elementos fundamentales de la cadena de valor para el desarrollo de la industria del biodiesel en México, basada en el aprovechamiento de la *Jatropha curcas*, planta oleaginosa nativa de este país. Los principios científicos y tecnológicos del proceso para convertir aceites orgánicos en biodiesel están bien establecidos desde hace ya muchos años, pero en el caso de México, y en particular en relación con el aceite de la *Jatropha*, poco se había hecho hasta entonces para fomentar su aprovechamiento.

Según lo establecido en la propuesta del Instituto, la iniciativa buscaba principalmente fortalecer la necesaria infraestructura científica, humana y técnica, para avanzar y profundizar en el conocimiento de las propie-

dades de la planta y el fruto de la *Jatropha*, y mejorar sus características genéticas con propósitos productivos. El cumplimiento de este objetivo implicaba desarrollar los elementos agronómicos necesarios para la producción masiva y económica de semilla como fuente de aceite para la producción de biodiesel, y desarrollar técnicas avanzadas para la recolección del fruto de las plantas así como para su procesamiento y extracción del aceite. Además, se buscaba contar con procesos y tecnologías optimizadas para la conversión del aceite a biodiesel, así como para la recuperación y beneficio de los subproductos. Pero de manera importante se pretendía desarrollar las tecnologías, métodos y sistemas necesarios para que las comunidades rurales ubicadas en zonas remotas produjeran sus propios combustibles para autogeneración de electricidad y otras aplicaciones productivas; o bien pudieran participar en el mercado de la energía como proveedores de materia prima.

La propuesta fue aprobada por CONACYT y, en su fase inicial, el proyecto contó con la participación de varias instituciones de investigación científica y tecnológica del ámbito agronómico y energético, de asociaciones de productores del campo, y de empresas del sector privado interesadas en el uso y la comercialización del biodiesel, que en ese momento era muy demandado en el mercado europeo a raíz de las metas establecidas allá para la sustitución de combustibles fósiles. Además, en México se debatía en el Congreso la ley de promoción de los bioenergéticos que ya en esa etapa había despertado un apetito voraz por el negocio de producción y venta de biocombustibles, al grado que el maíz, insumo útil para la producción de bioetanol, se escaseó artificialmente en el mercado nacional en un proceso especulativo en el que los productores e introductores anticipaban que sería más rentable su venta para la producción de bioetanol que como alimento para consumo humano, por lo que el Gobierno Mexicano se vio obligado a abrir las fronteras a la importación masiva de este grano, principal elemento de la dieta del mexicano.

En el ámbito político la *Jatropha* se convirtió en algo así como un cultivo milagroso que habría de sacar de la pobreza a los productores del campo, por lo que varios gobiernos estatales (Chiapas, Michoacán, entre otros) establecieron sendos programas de siembra y cultivo de esta oleaginosa, sin que a la fecha haya evidencia de resultados positivos. Por su parte, llegado el momento de pasar a la segunda fase del proyecto, CONACYT declaró no contar con presupuesto suficiente, con lo que el proyecto del

IIE, así como los de otras instituciones que atendieron la convocatoria de los **megaproyectos**, ya no pudieron avanzar más allá de la primera fase. Como alternativa, CONACYT decidió destinar a la creación de Redes Temáticas (una de ellas en energías renovables, que poco a poco se ha venido extinguiendo) el poco presupuesto que le quedaba disponible para los **megaproyectos**.

De la promoción, de vuelta al desarrollo

Energía de nopales

En el año 2010 la GER-IIE comenzó a involucrarse en un proyecto para la producción de biogás y electricidad a partir de la biomasa del nopal. El nopal es una cactácea endémica del continente americano que se encuentra ampliamente difundida en las regiones áridas y semiáridas de la república mexicana, pero ha logrado aclimatarse y adaptarse a condiciones de otras latitudes. Tiene pocas exigencias en su manejo y puede crecer en suelos muy pobres en nutrientes, pero también responde bien a condiciones mejoradas de riego, fertilización y control de plagas. Por sus altos rendimientos de biomasa, sus bajos requerimientos de agua y nutrientes, así como por su capacidad para desarrollarse en climas desérticos y semidesérticos con poca o baja precipitación pluvial, el nopal se sitúa como una importante fuente potencial de bioenergía.

El interés del Instituto en el aprovechamiento del nopal como fuente de energía se enmarcó dentro de lo establecido en las leyes emitidas un par de años antes para la promoción de los bioenergéticos y el aprovechamiento de las energías renovables. Por ese entonces un grupo de productores del campo en la región de Zitácuaro Michoacán, sin gran conocimiento de la tecnología de biodigestión, habían emprendido un proyecto para construir un biodigestor de nopal para producir biogás y, a través de la oficina México del Organismo de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), buscaron el apoyo de los investiga-



dores de la GER-IIE para lograr sus propósitos. Este hecho creó una gran oportunidad para aplicar los conocimientos previamente adquiridos por los investigadores del IIE en relación con los procesos de producción de biogás a partir de la biomasa de frutas y legumbres, y dio pie a la realización de experimentos de laboratorio para confirmar la viabilidad del proceso de biogasificación del nopal. Estos experimentos han dado información sobre el rendimiento de biogás por unidad de masa del nopal y han permitido establecer las condiciones bajo las cuales esto es posible en biodigestores de escala natural.

En paralelo a los trabajos de laboratorio, los investigadores del Instituto trabajan en colaboración con personal de la empresa NOPALIMEX, constituida en torno a este proyecto, con el propósito de mejorar el rendimiento de la planta de biogasificación ubicada en la Ciudad de Zitácuaro. Se busca con ello obtener información útil para desarrollar el paquete tecnológico que permita reproducir la tecnología bajo distintas condiciones de climas y terrenos, y a distintas escalas. Las actividades continúan en esa dirección con la participación de investigadores del Campo Experimental Bajío del Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de la SAGARPA, quienes aportan su conocimiento sobre los aspectos agronómicos del cultivo del nopal. El propósito de estos trabajos es viabilizar la posibilidad de instalar en comunidades rurales plantas de generación eléctrica operadas con biogás de nopal, integradas a unidades productivas que impulsen el desarrollo económico local. El modelo se basa en el esquema establecido en la unidad que opera en Zitácuaro, donde la energía obtenida de los nopales sustenta la operación de una planta procesadora de productos de maíz. Objetivos adicionales e importantes de la actividad conjunta NOPALIMEX-IIE-INIFAP son la optimización del cultivo del nopal para fines energéticos, la inclusión de las comunidades rurales en el ámbito energético, y la creación de empleos.



El nopal tiene actualmente muchas aplicaciones, dependiendo de la variedad de que se trate: forrajero para alimentar ganado, tunero para comercializar directamente el fruto o producir jaleas y mermeladas, para producir grana cochinilla para la industria textil, en la industria de los cosméticos, y para la alimentación humana, principalmente en la gastronomía mexicana donde los “nopalitos” tienen usos en una variedad de

platillos, postres y bebidas. Es esta última aplicación la que ha llevado a algunos individuos, tanto en el ámbito de CONACYT como en el de la SENER, a cuestionar la conveniencia de destinar la biomasa del nopal para producir energía. Sin embargo, esta inquietud podría estar poco fundamentada, ya que existen en México una gran variedad de especies de nopales, siendo reconocidas 377 de ellas, de las cuales cerca de la mitad es explotada de manera artesanal o industrial, mientras que las restantes se encuentran en forma silvestre sin ser debidamente explotadas. Además, con frecuencia la producción de nopal excede con mucho al consumo en sus distintas aplicaciones por lo que, contrario a lo que se aduce, su uso para fines energéticos ayudaría a balancear los mercados.



Tan es así que, con fondos concurrentes de CONACYT, la empresa cementera Cruz Azul ha construido ya una planta de generación eléctrica de 1 MW de capacidad a partir de la biomasa del nopal que le provee un grupo de productores del campo en el Estado de Aguascalientes. Por su parte, el Gobierno de la Ciudad de México recientemente hizo aportaciones de capital para que los productores de nopal de la zona de Milpa Alta, Distrito Federal, procedan a construir un biodigestor para convertir en energía los remanentes del cultivo de “nopalitos”.

La idea de producir biogás a partir del nopal no es nueva. Todo apunta a que se originó al sur del continente americano, en Chile para ser más precisos. Sin embargo, ha sido en México donde esta innovación ha tenido los avances más significativos. Al cierre de la edición de este libro la planta de la empresa NOPALIMEX contaba ya con cinco años de operación continua y puede ser considerada como la más antigua de su género en el mundo ligada a una actividad productiva. La noticia del éxito de esta operación ha trascendido a otros confines, lo que ha generado gran interés de gobiernos y empresarios por llevar la tecnología a otros estados y a otras naciones. El paquete tecnológico que desarrolla la GER-IIIE en conjunto con INIFAP permitirá realizar este proceso de manera eficaz y expedita.

Energía del bambú

Otra área de reciente interés para la investigación en el IIE es el uso de bambú como materia prima para producir electricidad. El bambú es una planta herbácea de rápido crecimiento y alto rendimiento que crece espontáneamente en muchas regiones del mundo con clima cálido y templado. Existen muchas variedades de bambú que son utilizadas con diversos fines, tanto en la industria de la construcción de viviendas, como en la fabricación de muebles, la industria del papel, e incluso en la industria textil. Según los especialistas en la materia, el cultivo del bambú no requiere de pesticidas ni herbicidas, y por lo general el requerimiento de fertilizantes es muy bajo o prácticamente nulo; crece en suelos pobres y ayuda a prevenir la erosión de los mismos. Estos atributos lo convierten en una fuente atractiva de biomasa para la producción de energía y, debido a su rápido crecimiento (superior a un metro de altura por día en regiones con clima y humedad adecuados), es un cultivo propicio para la captura de CO_2 .



El principal uso del bambú como energético es en forma de carbón vegetal, en sustitución del carbón de madera, como medida para disminuir la deforestación en varios países asiáticos. El carbón puede obtenerse por medio de la pirolisis del bambú, pero cambiando los parámetros de este proceso es posible obtener gas combustible, conocido también como *gas de síntesis*. Aunque el poder calorífico de este gas es más bajo que el obtenido por gasificación de madera, tiene la ventaja de contener muy poco azufre, lo cual es bueno para alargar la vida útil de los motores.



Gracias a un financiamiento del Fondo SENER-CONACYT Sustentabilidad Energética, el Instituto inició un proyecto para el diseño y construcción de una planta piloto para la gasificación de bambú. Se tiene avanzada ya la etapa de construcción y prueba del primer prototipo del gasificador, actividad que se realiza en la localidad de Huatusco, Veracruz, en colaboración con la empresa BAMBUVER dedicada, entre otros negocios, al cultivo y comercialización del bambú. Al igual que en el caso del nopal, el propósito de este proyecto es desarrollar el paquete

tecnológico que permita la réplica de la tecnología en comunidades rurales del país y de otras regiones. El *gasificador* es del tipo lecho fijo corriente descendiente, que tiene la ventaja de que los compuestos de alquitrán son destruidos al pasar por la zona de alta temperatura del equipo con lo que los gases producidos son más limpios y menos dañinos para los motores que los utilicen. Al momento de escribir estas líneas se hacían los primeros ensayos para mantener estable el proceso de gasificación. Una vez que esto se logre, se integrará la planta piloto en la que el gas de síntesis producido se alimentará a un motogenerador para producir electricidad. Tanto la electricidad como el calor que el proceso disipe serán destinados a la operación de una instalación hotelera para demostrar la viabilidad del autoabastecimiento energético a partir del bambú en una operación comercial. El proyecto se desarrolla también en colaboración con la empresa CUMMINS de México quien ha facilitado el motogenerador para este propósito.



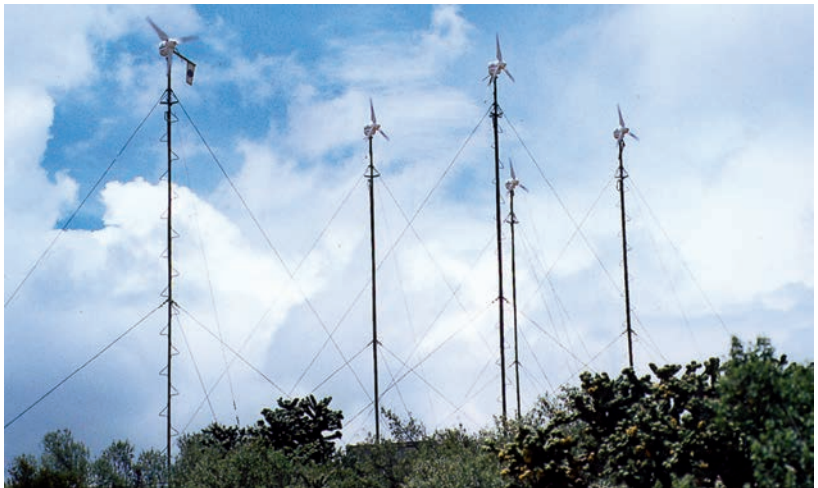
Energía eólica

La energía eólica ha sido utilizada por el hombre desde épocas remotas para una variedad de aplicaciones: el impulso de embarcaciones, la molienda de granos, el bombeo de agua, y otras similares. Hoy en día, aplicaciones como el bombeo de agua son todavía lugar común en muchas regiones, principalmente en países en desarrollo; y la propulsión de embarcaciones con el viento se practica en veleros y yates para fines recreativos. El interés por generar electricidad con la energía del viento data de fechas más recientes, motivado en parte por la necesidad de proveer fluido eléctrico en regiones de difícil acceso mediante extensiones de la red eléctrica. Por mucho tiempo y hasta principios de la década de 1970 se pensaba que el aprovechamiento de la energía eólica estaba limitado a pequeñas instalaciones para bombeo de agua y electrificación en el ámbito rural.

La historia de la tecnología eólica moderna para la producción de electricidad en el mundo comenzó a finales de esa década, época en que las máquinas para producir electricidad (aerogeneradores) eran de pequeña potencia, 30 a 50 kilowatts (kW). Pero ya para principios de la década de 1990 las turbinas eólicas habían alcanzado capacidades de varios cientos de kW. En la actualidad, los productos comerciales en su mayoría tienen potencias superiores a los 1500 kW (1.5 MW), y se fabrican e instalan turbinas de 3, 5 y hasta 8 MW, con rotores que llegan a alcanzar los 130 metros de diámetro.

Los primeros pasos en el IIE

La actividad eólica en el Instituto dio inicio en febrero de 1977 con un proyecto denominado “Aprovechamiento de la Energía Eólica”, cuya motivación fue la necesidad de cubrir una importante área dentro del campo de estudio de lo que entonces se denominaba Departamento de Fuentes Avanzadas de Energía y ahora es la Gerencia de Energías Renovables. Este proyecto debía servir de apoyo, en cuanto al desarrollo tecnológico de equipo conversor de energía eólica, al proyecto de “Sistemas Energéticos Integrados” contratado por la Gerencia General de Electrificación Rural de CFE, y que constituyó el primer contrato comercial del IIE en su historia. Las metas del proyecto de aprovechamiento de la energía eólica incluían la recopilación de información a nivel nacional sobre velocidades de viento, que, sobra decirlo, era entonces muy escasa, y la elaboración de una metodología de prospección para determinar lugares con potencial eólico. Se incluía también dar inicio a la evaluación del potencial energético de la zona de La Ventosa, Oaxaca, así como el de la región donde se ubicaba la estación experimental eólica El Gavillero que el Instituto tenía cerca de la población rural del mismo nombre en el municipio de Huichapan del Estado de Hidalgo, como apoyo al diseño y desarrollo de prototipos de pequeños generadores eólicos para el proyecto de Sistemas Energéticos Integrados. Un año después el proyecto de aprovechamiento de la energía eólica se organizó en tres áreas: la de Meteorología, la de Análisis de Aplicaciones y Sistemas, y la de desarrollo de Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE).



Pequeñas máquinas eólicas

Las primeras acciones del IIE en el tema de equipos para aprovechar la energía eólica se encaminaron al desarrollo de equipos mecánicos para el bombeo de agua en zonas rurales, con criterios de diseño basados en la sencillez y alto grado de integración nacional. Entre los primeros dispositivos que fueron construidos y probados, en algunos casos en aplicaciones prácticas, se incluyen un aeromotor de velas para aplicaciones mecánicas, una aerobomba tipo Savonius, un aerogenerador de 1.5 kW utilizando alternadores automotrices, y un aerogenerador con rotor tipo Savonius de 200 watts. El aeromotor de velas se instaló en la población de San Rafael, en el Estado de San Luis Potosí en octubre de 1979, y por un tiempo cumplió con su cometido de bombear agua para dar servicio a la población, con un gasto de casi 16 metros cúbicos por día a 30 metros de elevación. En esa misma población, y por las mismas fechas, se instalaron con fines de prueba la aerobomba y el aerogenerador del tipo Savonius.

La estación experimental de El Gavillero contaba con un pequeño taller mecánico y un espacio con literas de madera donde pernoctaban los investigadores mientras permanecían en el sitio durante los períodos de prueba de las pequeñas máquinas eólicas. El pequeño aerogenerador de 1.5 kW fue el primero en ser instalado en la estación, en 1979, con el doble propósito de cargar las baterías eléctricas que servían para dar el servicio de alumbrado de la estación, dando al mismo tiempo energía



para las telecomunicaciones, y para evaluar su desempeño a fin de mejorar su diseño. La estación de El Gavillero fue originalmente construida por la Gerencia General de Operación de la CFE en la zona y tenía como propósito instalar ahí una microcentral eólica para dar servicio eléctrico a la comunidad de El Gavillero. Este proyecto no prosperó, por lo que en febrero de 1977 la estación fue cedida al Instituto. Con el paso del tiempo la población en la comunidad de El Gavillero aumentó, por lo que la construcción de casas habitación llegó hasta los linderos de la estación y, bardo de por medio con el terreno de la estación, se construyó una escuela. Por consideraciones de la seguridad de los niños en la escuela y de las familias cercanas, y ante la perspectiva de emprender desarrollos de máquinas eólicas de mayor tamaño, el IIE decidió dismantelar la estación en 1996 y procedió a plantear el desarrollo de una nueva estación de pruebas eólicas en otro sitio.

La estación de El Gavillero fue de mucha utilidad en los inicios del desarrollo eólico del país, pues ahí se probaron varios prototipos de pequeños aerogeneradores de eje horizontal: el de 1.5 kW mencionado en el párrafo anterior, de tres aspas de aluminio, con control centrífugo de ángulo de ataque (1977-1978); el *Fénix*, de 2 kW, tres aspas fijas de lámina de hierro y control de cola plegable (1981-1983); el *Albatros* con rotor consistente en tres aspavelas, con estructura de aluminio y forradas con tela de dacrón de alta resistencia, de 11 m de diámetro, conectado mediante transmisión de cadena al generador de 10 kW (1981-1985); una siguiente versión del *Albatros* con tres aspas de fibra de vidrio, con control por torcimiento del aspa (1986-1987); la segunda versión del *Fénix*, con tres aspas de fibra de



vidrio (1992-1995); y la *Avispa*, de 500 Watts, eje horizontal, tres aspas de fibra de vidrio y control por timón de cola plegable (1990-1995). En la estación de El Gavillero se realizaron también las pruebas del Colibrí, un aerogenerador de 5 kW desarrollado por la empresa mexicana Fuerza Eólica y que es el único en su clase que se fabrica y comercializa en México desde principios de la década de 1980. Para finales de esa misma década ya se habían desarrollado pequeños aerogeneradores, con potencias desde 25 W hasta 500 W para carga de baterías, así como una bomba mecánica, llamada “Itia”, con rotor de 5 aspas metálicas y 2.5 m de diámetro, que fue objeto de una patente para el Instituto. La licencia sobre el diseño de esta aerobomba de ¼ de HP de potencia fue otorgada a una empresa nacional para su fabricación con fines comerciales, actividad que nunca llegó a concretarse, principalmente por falta de financiamiento a los potenciales usuarios finales.

Estos primeros desarrollos contaron en sus inicios con el apoyo económico y la asesoría de la organización *VITA* (*Volunteers in Technical Assistance*), agencia estadounidense no lucrativa de divulgación técnica para países en vías de desarrollo, que contó con financiamiento de la Fundación *General Electric*. Los trabajos posteriores en la segunda versión del *Albatros*, y para la aerobomba *Itia* se realizaron con fondos proporcionados por el Programa Mar del Plata de la Organización de Estados Americanos (OEA). Este financiamiento que llegó en un periodo crítico de devaluaciones de la moneda mexicana, permitió habilitar un taller móvil y la construcción del *Túnel de Viento* que aún presta servicio y que se ubica en la sede del IIE en Cuernavaca, Morelos.



El aerogenerador “Avispa” de 500 fue reproducido a escala pre-industrial; se construyeron cerca de 40 máquinas de este tipo, con versiones para ambiente marino y para ambiente normal, que se instalaron en varias partes del país para pruebas en viento libre y en aplicaciones demostrativas. La más relevante de éstas fue la del hotel Villas Carrousel, cerca de Playa del Carmen en la Riviera Maya, donde se instalaron 17 pequeños sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-baterías, cada uno de ellos con un aerogenerador “Avispa”. Una reseña más amplia de esta aplicación se encuentra en la sección de *Sistemas Híbridos* en este libro.



El desarrollo de aerobombas y aerogeneradores en el Instituto se detuvo por un período de casi 15 años, con lo que las capacidades técnicas y humanas que en un principio habían sido creadas se fueron desvaneciendo poco a poco, principalmente por falta de recursos económicos. A lo largo de los años el IIE siguió insistiendo en la necesidad de emprender el desarrollo de tecnología propia de aerogeneradores, al considerar que cerca del 75% del costo de una central eolieléctrica corresponde al costo del aerogenerador. A principios de la década de 1990 se formularon propuestas para emprender el desarrollo de aerogeneradores de 600 kW y 750 kW (en ese tiempo las máquinas de 600 kW eran las más comerciales y ya estaban entrando en el mercado las de 750 kW); no obstante, en el ámbito nacional no hubo interés y, con ello, la brecha tecnológica de México con otros países se fue haciendo más grande, quedando el nuestro a la zaga cuando llegó el despegue de la tecnología moderna de aerogeneradores.

Labores tempranas de promoción

Las primeras propuestas para aprovechar la energía eólica como medio de diversificación energética en México surgieron un poco antes de 1980. Estas propuestas no fueron de corta visión; por el contrario, se sugirió la construcción de varias centrales eoloeléctricas integradas con aerogeneradores de gran tamaño en la zona de fuertes vientos del Istmo de Tehuantepec en Oaxaca. De manera persistente, mediante estudios sustentados, conferencias y publicaciones, el personal del Instituto fue demostrando la viabilidad de la generación eoloeléctrica en México y a ello se fueron sumando personas clave que posteriormente apoyarían la idea desde sus diversos ámbitos de competencia.

En 1987, personal de la GER-IIE realizó la formulación y evaluación de un proyecto eoloeléctrico de 30 MW para La Venta, Oaxaca. Y un año después, en octubre de 1988 durante la Conferencia Americana de Energía Eólica, investigadores del IIE presentaron una ponencia en la que se mostró que el recurso del Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec era más que suficiente para instalar un complejo eoloeléctrico más grande y más productivo que el de *Altamont Pass* en California, entonces el más grande del mundo.



A raíz de las modificaciones a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica ocurridas en 1992, mediante las cuales se autorizó la generación de electricidad en la modalidad de autoabastecimiento, el Instituto promovió el desarrollo de un proyecto eoloelectrico con fines de autoabastecimiento para el alumbrado público del Municipio de Zacatecas. El proyecto se elaboró con miras a ser construido en el llamado “Cerro de La Virgen”, en las inmediaciones de la Ciudad de Zacatecas. Previamente, por encargo de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, la GER-IIE había realizado mediciones de la intensidad del viento en ese cerro y con base en esa información determinó que una minicentral eólica de 2 MW de capacidad podría abastecer hasta el 75% del consumo eléctrico para el alumbrado público del municipio. Se especificó que la minicentral estaría integrada por 25 aerogeneradores comerciales de 80 kW de capacidad unitaria, conectados a un transformador de 500 kVA con salida a 13.8 kV, y ligada con la red de la CFE en la subestación Zacatecas. El financiamiento para la obra (10,000 millones de aquellos pesos con muchos ceros) fue otorgado por BANOBRAS, el cual sería pagado por el Ayuntamiento con los ahorros logrados al disminuir el consumo eléctrico proveniente de la CFE gracias a lo generado con el viento. Este habría sido el primer proyecto municipal de autoabastecimiento eléctrico en México. Pero a pesar de que el proyecto había sido formulado de manera correcta, durante la ejecución de las primeras etapas de la obra, y al cambio de autoridades estatales y municipales, el proyecto fue unilateralmente suspendido por el cabildo municipal entrante, lo que llevó finalmente a conflictos políticos y financieros que significaron su muerte antes de nacer. El Cerro de la Virgen sigue representando



un atractivo para desarrolladores de proyectos eólicos e inversionistas, pero hasta la fecha no se ha instalado ahí ningún aerogenerador.

En 1993, la CFE licitó la construcción de la primer central eoloeléctrica en México, conocida como La Venta I. Ésta, con carácter de planta piloto, fue construida precisamente en la población de La Venta, en la región del Istmo de Tehuantepec, en el Estado de Oaxaca. Entró en operación en 1994, con capacidad de casi 1.6 MW, constituida por siete aerogeneradores de 225 kW de fabricación danesa, y fue por un período de casi diez años la única central eólica operando regularmente en el país. Mientras tanto en otras partes del mundo las instalaciones eólicas crecían a tasas de más de 30% por año. Sin embargo, esta pequeña central confirmó lo pronosticado por los investigadores de la GER-IIE: ahí, la tecnología eoloeléctrica fue capaz de operar con factores de planta de los más altos en el mundo. Para 1995, la CFE tenía ya formulado un segundo proyecto eoloeléctrico de 54 MW para ser instalado también en La Venta, Oaxaca, pero que año tras año fue diferido hasta que, finalmente en el año 2007, el proyecto habría de ser construido con una capacidad de 83 MW y sería denominado La Venta II.

En 1997, el IIE realizó un estudio por encargo de la Comisión para la Cooperación Ambiental de Norteamérica (CCA), que tuvo como objetivo analizar la factibilidad de un proyecto de generación eólica de 150 MW en la zona de La Ventosa, Oaxaca. Los resultados de este estudio demostraron la viabilidad económica de instalar centrales eólicas de gran tamaño en esa región. El año siguiente, el Instituto publicó la monografía *Energía Eólica: centrales eoloeléctricas*, mientras que el Programa Universitario de Energía de la UNAM publicó el libro *Estado del Arte y Tendencias de la Tecnología Eoloeléctrica*; ambas obras realizadas por investigadores de la GER-IIE. En estos documentos se presenta el estado del arte del desarrollo eoloeléctrico a nivel mundial a la fecha de su publicación (1998), detalles de la tecnología, implicaciones y oportunidades de desarrollo de proyectos, así como propuestas de aprovechamiento en México para instalar hasta 5,000 MW eoloeléctricos.



Vientos de cambio

En un período relativamente corto, tres factores se conjugaron para imprimir una nueva dinámica a la actividad eólica en el IIE: la incorporación formal del Instituto al Acuerdo de Implementación para la Cooperación en la Investigación, Desarrollo y Disseminación de Sistemas de Generación Eoloeléctrica (Acuerdo Eólico) de la Agencia Internacional de la Energía, en 1997; la firma de un convenio de colaboración entre el IIE y el Gobierno del Estado de Oaxaca para dar impulso al desarrollo eólico del Istmo de Tehuantepec, en el año 2000; y el acceso a fondos internacionales provenientes del Fondo Global para el Medio Ambiente (GEF por sus siglas en inglés) destinados a remover barreras para la implementación de la energía eólica en México, en el año 2003.



El Acuerdo eólico

El Acuerdo Eólico es el foro de la Agencia Internacional de la Energía donde se construyen los principales elementos de investigación, desarrollo tecnológico, de política y estrategias de impulso al desarrollo de la energía eólica en los países de la OCDE, y en el cual confluye la acción concertada de los 21 países con mayor grado de desarrollo económico en el mundo. El IIE es el organismo signatario por parte de México en este Acuerdo en el que la GER-IIE funge como representante nacional y canal para la asimilación tecnológica y la transferencia hacia México de conocimiento sobre los diferentes ámbitos que sirven para impulsar el desarrollo eólico en un país. Las principales acciones de la GER-IIE en el contexto de este Acuerdo incluyen la diseminación de información en el ámbito nacional y la organización de eventos internacionales, cuyo punto de partida fue la organización, en 1999, de un seminario sobre las experiencias, las políticas y las estrategias para el impulso a la energía eólica en varios países, impartido por miembros del Comité Ejecutivo de dicho Acuerdo y al que asistieron representantes y funcionarios del sector público y privado de México. Fue en esta ocasión que el Gobierno del Estado de Oaxaca manifestó de manera explícita y comprometida su interés por desarrollar la energía eólica en el Istmo de Tehuantepec.

El convenio con Oaxaca

A partir de la firma del citado convenio, el IIE inicia una intensa colaboración con el Gobierno del Estado de Oaxaca para promover el desarrollo eoloeólico de lo que se ha dado en llamar “El Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec” y en el cual, quince años después al momento de escribir estas líneas, se tenían ya cerca de 2,500 MW de centrales eólicas en operación, y otras tantas en distintas etapas de desarrollo. Desde un inicio el Gobierno del Estado de Oaxaca ha considerado este como un proyecto estratégico para el desarrollo regional; y el Gobierno Federal lo ha tomado como la plataforma sobre la que ha establecido la meta eólica del Programa Especial de Energías Renovables, cuya publicación anual fue establecida por ley en 2009. Durante el período de 2000 a 2005 el IIE, en colaboración con el Gobierno del Estado de Oaxaca, organizó reuniones anuales, llamadas *Coloquios* (que posteriormente habrían de continuar bajo el liderazgo del propio Gobierno, aunque a intervalos menos regulares y con una temática más variada) cuyo objetivo principal fue propiciar la creación de una visión común de lo que debería ser el desarrollo eólico en esa región, e identificar las principales barreras a tal propósito, así como los mecanismos para removerlas y las responsabilidades y funciones de cada sector en esta empresa. A lo largo de los años participaron en estos *Coloquios* funcionarios de diversas instituciones federales (SENER, Semarnat, CFE, CRE, CONAE), funcionarios del propio Gobierno del Estado de Oaxaca, presidentes municipales de la región, empresarios nacionales y extranjeros, representantes de institu-



ciones financieras, representantes de organismos internacionales (Banco Mundial, GEF, PNUD), agencias para el desarrollo de algunos países (Estados Unidos, Alemania), representantes ejidales y de organizaciones civiles, tecnólogos, investigadores y académicos. El lector puede encontrar una descripción más detallada del proceso del desarrollo eólico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, en el libro “Primer Documento del Proyecto Eoloeléctrico del Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec”, elaborado conjuntamente por personal de la GER-IIE y del Gobierno de Oaxaca, y publicado en 2005.

Los Coloquios Eólicos se convirtieron en el principal foro nacional de promoción y discusión sobre el tema del desarrollo eoloeléctrico, no solo en lo que concierne al corredor del Istmo de Tehuantepec, sino también para el resto del País. En este ámbito, los empresarios del sector eólico, que ya comenzaban a crecer en número y diversidad, decidieron vincularse formalmente y en enero de 2005 constituyeron la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), que se ha convertido en el pivote de las acciones para el desarrollo de proyectos comerciales de generación eoloeléctrica en el país.



De los coloquios y de comunicaciones posteriores entre los participantes surgieron ideas que se convirtieron en iniciativas y logros relevantes. Por ejemplo, las relativas a la adecuación del marco regulador, las propuestas para superar la limitación de la infraestructura de transmisión de energía eléctrica, la conveniencia de contar con una norma ambiental para el desarrollo eoloeléctrico, y las acciones para fomentar la regularización de la tenencia de la tierra, entre muchas otras.

Sin lugar a dudas, los *Coloquios* para el desarrollo eólico del Istmo de Tehuantepec constituyeron el parteaguas del desarrollo eólico nacional. Previo a ellos, solamente existía en México, en La Ventosa, Oaxaca, la pequeña central eólica de La Venta I de 1.6 MW, y una turbina más, de 600 kW, en Guerrero Negro, en la península de Baja California. El encuentro y el diálogo entre empresarios, funcionarios públicos y actores interesados en el tema, permitió conocer y aquilatar los esfuerzos y la problemática de unos y otros, así como las limitaciones del marco legal, regulador y normativo entonces vigente en el país, a la par que las implicaciones y grados de complejidad para adecuarlo o innovarlo.

El proyecto GEF

El interés por desarrollar la generación eoloelectrica en México se incrementó conforme se fueron dando los primeros *Coloquios* anuales; sin embargo, las acciones concretas siguieron siendo muy limitadas. Así mismo, los presupuestos destinados para dicho fin en el sector oficial seguían siendo realmente pobres al compararse con lo que los gobiernos de otros países estaban invirtiendo, no solamente los países industrializados sino otros con similar desarrollo económico al de México como la India, Brasil y China. Ante esta situación, la GER-IIE buscó apoyo en el ámbito internacional. Para ello, a finales de 1999 formuló un proyecto que fue acogido por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y mediante el cual se gestionó apoyo económico por parte del GEF. Con la anuencia de la SENER y el endoso de la Secretaría de Hacienda el proyecto fue oficialmente presentado al Directorado del GEF para su aprobación y financiamiento, lo cual ocurrió en diciembre de 2003. Así es que nace el proyecto “Plan de Acción para Eliminar Barreras para el Desarrollo de la Generación Eoloelectrica en México (Plan de Acción Eólico)”. El proyecto inició a principios de 2004 con la GER-IIE como Agencia Ejecutora, el PNUD como Agencia Implementadora, y un presupuesto de 4.7 millones de dólares a fondo perdido, más aportaciones en especie del Instituto y otras entidades del sector público de México. Los objetivos principales del Plan de Acción Eólico fueron: desarrollar capacidades locales; evaluar el recurso eólico en áreas prometedoras del país; contribuir al análisis y elaborar propuestas de mejora a los marcos legal, regulador e institucional que influyen en el desarrollo de la generación eoloelectrica en México; y promover proyectos de generación eoloelectrica.

Sobre el Plan de Acción

En mayo de 2005, y bajo los auspicios del Proyecto GEF, la GER-IIE organizó el taller “Ruta Tecnológica de la generación Eoloeléctrica en México: una Visión al año 2030”. En este taller participaron funcionarios de SENER, SEMARNAT, Secretaría de Economía, CFE, CRE, CONUEE, Gobierno del Estado de Oaxaca, AMDEE, Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), Programa Universitario de Energía (PUE-UNAM), y del PNUD, entre otros. Su objetivo fue lograr consensos sobre la situación que prevalecía en aquel momento en torno al aprovechamiento de la energía eólica en México, y a partir de ellos construir una visión común de lo que en esta área debería hacerse en el país en los siguientes 25 años, y plantear la hoja de ruta para lograrlo.

La visión planteada para el 2030 por los participantes en el taller fue que la Energía Eólica contribuirá significativamente al suministro energético nacional, con tecnología propia de clase mundial. En el mismo evento se identificaron áreas que requerían (y todavía requieren) atención prioritaria: formación de recursos humanos y generación de conocimiento para el aprovechamiento de la energía eólica; creación en el país de la cadena de valor correspondiente, y establecimiento del marco institucional para el fomento de la energía eólica, que en ese tiempo era prácticamente inexistente. Además, se establecieron indicadores que permitieran medir el progreso del país hacia la visión establecida: lograr que 6% de la generación de electricidad se produjera mediante energía eólica; lograr un grado de integración nacional del 80% en los aerogeneradores instalados en el país, con tendencia al 100%; contar con una capacidad eoloeléctrica instalada mínima de 10,000 MW; contar con infraestructura eléctrica de líneas de transmisión suficiente para incorporar la capacidad eoloeléctrica necesaria para portear hacia los centros de carga la electricidad producida por centrales eólicas; y contar con suficientes recursos humanos especializados en operación y mantenimiento de las centrales, así como para la identificación, formulación, evaluación y gestión de proyectos eoloeléctricos.

Hoy, diez años después, el país camina a diferentes ritmos y con fuerzas impulsoras de distinta naturaleza hacia la consecución de una realidad que parece coincidir con la visión desarrollada en aquel taller; corresponde al lector establecer las similitudes de lo que se ha logrado hasta la fecha y de lo que se logre en los años venideros. Por lo que toca al IIE, su

tarea ha sido y seguirá siendo impulsar el avance en esa misma dirección, para lo cual ha identificado, apoyado, o realizado estudios y acciones tendientes a eliminar las barreras entonces identificadas.

En septiembre de 2007 la GER-IIE organizó un “Taller sobre Avifauna y Aerogeneradores en el Istmo de Tehuantepec”, cuyos resultados sirvieron de insumo para los trabajos entonces liderados por el Departamento de Energías Renovables de la SEMARNAT para el desarrollo de una “Norma Oficial Mexicana para la Protección del Medio Ambiente durante las actividades de Construcción, Operación y Abandono de Instalaciones Eoloeléctricas en Zonas Agrícolas, Ganaderas o Eriales”. También en apoyo al desarrollo de dicha norma, el Instituto contrató un estudio titulado “Recopilación y Análisis de Estudios a Nivel Mundial del Impacto que tienen sobre la Avifauna y los Murciélagos las Instalaciones Eoloeléctricas en Zonas Agrícolas Ganaderas o Eriales”.

En otra acción, la GER-IIE colaboró con la CONAE (CONUEE) en la elaboración de una “Guía de Trámites para la Construcción de Proyectos de Energía Renovable en México”, la cual ha servido para dar orientación a desarrolladores de proyectos. También, con apoyo de expertos internacionales, se elaboró la “Guía de Mejores Prácticas para el Desarrollo, Construcción y Operación de Proyectos Eoloeléctricos en México”, a partir de la recopilación, análisis y adecuación de las mejores prácticas y recomendaciones que se aplican en países avanzados en el tema.

Las preocupaciones en torno al marco institucional, jurídico y regulatorio surgen en aquel momento debido a que ya en el Congreso del país se discutía la primera iniciativa para la creación de una ley sobre energías renovables conocida como Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (LAFRE). Esta ley llegó a ser aprobada por los diputados pero no logró la aprobación de los senadores (posteriormente, en 2008, vendría la iniciativa de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), que fue puesta en vigor con la aprobación de ambas cámaras. En ese período el IIE contrató a un grupo de especialistas en cuestiones jurídicas quienes elaboraron el documento Análisis y Propuestas de Mejora a los Marcos Legal, Regulador e Institucional que influyen en el Desarrollo de la Generación Eoloeléctrica en México. Este documento sirvió de insumo para el análisis y discusión de propuestas en un taller organizado con ese propósito, en el cual participaron, entre otros, fun-

cionarios del sector energético nacional y del gobierno de Oaxaca. En su momento los resultados fueron puestos a consideración de la SENER.

En materia tecnológica, en 2004 el Instituto fue contratado para dar apoyo a la SENER/CRE con estudios para determinar la pertinencia de reconocer crédito por capacidad a las centrales eoloelectricas, que en principio no contaban con tal prestación debido a su discontinua operación derivada de la naturaleza intermitente del viento. Dichos estudios tuvieron una cobertura de 10 años, basados en información de resultados operativos de la central eoloelectrica La Venta I. El instrumento regulador derivado de esos estudios entró en vigor en enero de 2006, lo que a decir de desarrolladores de proyectos ha contribuido a incrementar la factibilidad económica de los proyectos eoloelectricos desarrollados en La Ventosa.

Durante un período de varios años el IIE destinó esfuerzos considerables a promover el desarrollo de proyectos de generación eólica mediante foros organizados en varias entidades del país en los cuales se abordaron temas sobre las tecnologías de aerogeneradores, la evaluación del recurso eólico, lo relativo a las técnicas de desarrollo de proyectos, y las oportunidades locales y nacionales para el emprendimiento de negocios en el área. Tales actividades incluyeron también la elaboración y distribución de materiales de difusión, presentaciones en foros especializados, nacionales e internacionales, y la emisión de un portal *web* en el sitio del Instituto, que alberga mucho del material documental que al efecto se ha producido.

Las acciones de impulso del IIE a la generación eólica no han quedado solo en la promoción ya que también se ha trabajado y se continúa trabajando dando apoyo a la CFE y a empresas del sector privado para el desarrollo de sus proyectos. La asistencia del Instituto va desde la evaluación del recurso eólico, pasando por la generación de indicadores de autoabastecimiento de electricidad y la formulación de proyectos, hasta la realización de estudios de factibilidad técnica-económica.

CERTE

El rápido desarrollo eólico del México actual se ha basado principalmente en tecnología importada. Muchas causas han llevado a esta situación, entre otras, la falta de programas para el desarrollo tecnológico nacional en el tema y la limitada infraestructura técnica para apoyar los potenciales desarrollos. Atento a esa situación, el IIE ha implementado medios para facilitar la tarea. En 1977 se hizo cargo de la estación experimental eólica de El Gavillero, el cual años después fue desmantelado por las razones ya explicadas, y que a partir de entonces se tenía en proyecto la construcción de uno nuevo. Los fondos otorgados por el GEF/PNUD para el Plan de Acción Eólico hicieron posible materializar este proyecto mediante la construcción del Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE).



Se trata de una instalación sobre un terreno de 32 hectáreas, ubicado en las inmediaciones del poblado de La Ventosa, municipio de Juchitán, Oaxaca, el cual fue donado al Instituto por el Gobierno de aquella entidad. Tiene la característica de estar expuesto a los vientos intensos de la región, por lo que puede considerarse un sitio privilegiado de Clase I de acuerdo con la norma internacional, y goza de una ubicación estratégica en el actual corazón del desarrollo eólico del país. Cuenta con infraestructura consistente en una subestación eléctrica, y línea de interconexión a la CFE que permite inyectar a red la electricidad producida por aerogeneradores con capacidad acumulada total de hasta 5 MW, la cual se recolecta mediante una línea eléctrica subterránea en el interior del centro. El CERTE cuenta también con sala de control, aula de capacitación y taller-almacén, además de dos estaciones anemométricas en lo alto de torres de 80 y 40 metros de altura, habilitadas con estaciones climatológicas completas, así como medios para el monitoreo remoto de los aerogeneradores desde cualquier parte del mundo. Además, el Centro Regional cuenta con una plataforma para el desarrollo de *sistemas híbridos* sol-viento-baterías-motogenerador, destinada al estudio y optimización de este tipo de sistemas, como se describe en otra sección de este libro.

El CERTE entró en operación formal el 1 de julio de 2010, aunque desde tiempo atrás se venía utilizando para impartir cursos de diplomado y otras actividades relacionadas con el tema eólico. El Centro Regional tie-



ne, entre otros, los siguientes objetivos: facilitar las pruebas de prototipos de aerogeneradores y de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, de pequeña o gran capacidad, interconectados a red o aislados; proveer servicios a fabricantes de aerogeneradores interesados en la caracterización y mejora tecnológica de sus productos bajo condiciones locales; servir como un medio para la capacitación de ingenieros y personal técnico para la operación y mantenimiento de aerogeneradores y centrales eólicas; y servir de plataforma para la demostración, validación, evaluación y prueba de tecnologías en etapa pre-comercial.

Se busca, además, que el CERTE sirva para facilitar el encuentro entre empresarios nacionales y extranjeros, lo que pudiera conducir a la fabricación local de partes para aerogeneradores o para emprender negocios de riesgo compartido. La infraestructura actual del Centro Regional da pie para conformar una moderna y flexible instalación que sirva para obtener datos operacionales relacionados con la interconexión de aerogeneradores a la red de distribución de energía eléctrica; y como un medio para entender e internalizar las normas, métodos de prueba y certificación de máquinas eólicas, con el fin de detectar la necesidad de adecuarlos a las condiciones locales y actuar en consecuencia.

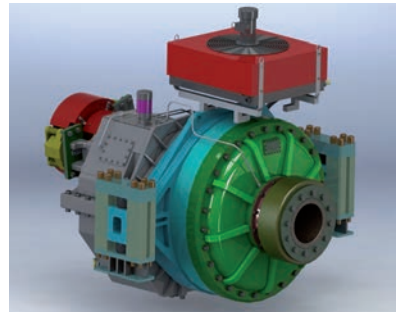
En el ámbito de la investigación y el desarrollo de tecnología, el CERTE ofrece la oportunidad para la vinculación entre empresas e instituciones de I+D interesadas, tanto del país como del extranjero, con miras al emprendimiento de proyectos demostrativos y experimentales. En la fecha de redacción de este texto se tiene instalado y bajo pruebas un aerogenerador prototipo de 300 kW de capacidad, fabricado por la empresa *Komai Tekko Inc* de Japón, cuya instalación se concluyó en diciembre de 2010. Además, se avanza en las negociaciones para instalar un aerogenerador comercial de 2 MW soportado por una torre de concreto de 100 metros de altura, diseñada por una empresa mexicana, cuyo desempeño será evaluado por investigadores del IIE con propósito de certificación. La operación del Centro Regional fue autorizada por la CRE en la modalidad de Pequeño Productor de Electricidad, lo que constituyó un hito en la historia eólica de este país, ya que fue el primer permiso otorgado en México dentro de esta modalidad. En tal categoría, el Instituto produce y vende electricidad a la CFE. Por otro lado, la operación de la turbina Komai ha permitido aprender de esta operación y ensayar e implementar mejoras importantes al diseño.

El proyecto MEM

La construcción del CERTE alentó la posibilidad de emprender el desarrollo de turbinas eólicas de mayor capacidad de las que hasta entonces se habían desarrollado en México. Para ello, en 2007 la GER-IIE tomó la iniciativa de integrar un equipo de trabajo conformado por investigadores de varias gerencias del IIE en asociación con el Centro CONACYT de Alta Tecnología (CIATEQ), para iniciar el desarrollo de un aerogenerador con capacidad mayor de 1 MW. La iniciativa fue aceptada por la Dirección Ejecutiva del Instituto, que a su vez la acordó con el Director del CIATEQ, por lo que una vez integrado el equipo de trabajo se emprendieron actividades de capacitación, tanto en México como en el extranjero, para los miembros del equipo. La capacitación fue impartida por expertos internacionalmente reconocidos en las técnicas avanzadas para el diseño de aerogeneradores modernos, y se adquirieron las herramientas de *software* requeridas para tal propósito.

En la etapa de diseño conceptual, el equipo de trabajo acordó proceder con la ingeniería de una turbina eólica de eje horizontal, de 1.2 MW de capacidad, destinada a operar en regiones con vientos intensos, la cual, una vez construida habría de ser instalada y probada en el Centro Regional. Ya avanzados los trabajos de ingeniería, en el año 2008 el Gobierno de la República creó el Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE), administrado por la SENER y el CONACYT, cuyo propósito es destinar recursos financieros para la innovación y el desarrollo tecnológico nacional en el área de las energías sustentables. En atención a la convocatoria 2009-1 del FSE, el IIE sometió a concurso la propuesta “Prototipo de Aerogenerador de 1.2 MW eléctricos o mayor” que fue aprobada por los comités correspondientes.

En 2010 se recibieron los primeros recursos para el proyecto, lo que permitió que tanto el IIE como el CIATEQ consolidaron los grupos de especialistas en las diversas disciplinas que confluyen en el diseño de máquinas eólicas, y se pudo continuar con el diseño de la turbina de 1.2 MW. Este fue un proyecto sin precedente en el país que llegó a ser conocido como la Máquina Eólica Mexicana (MEM), o proyecto MEM. Los resultados de los diseños completos de cada uno de los doce subsistemas que integran la MEM fueron oficialmente presentados en 2012 al Comité del Fondo para



que con base en los resultados de su evaluación se autorizaran los fondos requeridos para pasar a la etapa de construcción de dicha máquina.



Debido a los tiempos requeridos para la evaluación (nacional e internacional) del proyecto, el momento político del fin de una administración federal y el inicio de la siguiente, y el cambio de esquema para la aplicación de recursos para el tema eólico por parte del Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE), el Proyecto MEM sufrió una interrupción de casi dos años. En el curso de esta transición política, el Gobierno de México creó una nueva figura, conocida como Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE), lo que para el Instituto significó lograr mediante concurso la coordinación del correspondiente al tema eólico. A la fecha en que se escribían estas líneas, los principales elementos de la MEM se encontraban ya en proceso de fabricación, o de asignación de los contratos para tal propósito, con los recursos aportados al IIE por el FSE a través este mecanismo.



Pero este nuevo mecanismo de financiamiento no cubrió todos los elementos requeridos para la fabricación del prototipo de la MEM. Quedaron fuera de presupuesto las aspas –elemento fundamental para el accionamiento de la turbina–, la torre, y obras civiles como la cimentación. Gestiones hechas previamente por la GER-IIE, a través del Banco Interamericano de Desarrollo, posibilitaron la obtención de recursos adicionales del GEF, que permitirán suplir esta limitación. Se trabaja ya en lo concerniente a la obtención de estos elementos en un esquema de aprender haciendo bajo la asesoría de expertos internacionales, y se busca con este esquema asimilar la tecnología y sentar las bases para posibilitar el desarrollo de una industria nacional en el tema.

CEMIE eólico

A finales del año 2013 el Fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética lanzó una convocatoria para conformar el Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-E). Esta convocatoria estableció que este Centro debía constituirse por un consorcio de instituciones de investigación y empresas vinculadas para trabajar en favor del aprovechamiento de la energía eólica en el país mediante el desarrollo y la consolidación de capacidades.

El IIE sometió una propuesta ganadora con lo que el 14 de febrero de 2014 se suscribió el convenio de asignación de recursos para la operación del CEMIE-E, el cual quedó constituido por 32 miembros cuya labor se orienta hacia la ejecución de proyectos eólicos estratégicos para el sector energético del País. Se trata de centros públicos de investigación y empresas mexicanas, que en mayor medida y con mayor objetividad han realizado proyectos o acciones concretas en materia de investigación, desarrollo tecnológico, investigación aplicada, estudios especializados o innovación en los diferentes tópicos de la disciplina de aprovechamiento de la energía eólica. También se incluyen instituciones que, a pesar de no tener alguna trayectoria definida en el tema, muestran amplio interés y capacidades potenciales, y que están ubicadas en regiones que resultan clave para apoyar el desarrollo eólico del país. La gestión del Centro es un proceso dinámico que permite que en el futuro se incorporen nuevos miembros.



El Instituto busca hacer del CEMIE-E un referente en el desarrollo de tecnología y conocimiento en materia de energía eólica y contribuir al aprovechamiento de ésta como una de las fuentes de energía renovable más utilizadas del país. Para ello ha establecido la visión de contar con conocimiento unificado en materia de energía eólica y generar sinergias que permitan orientar las actividades de innovación, investigación y desarrollo tecnológico con el fin de contribuir al fortalecimiento de la industria eólica del país.

Entre los objetivos del Centro está promover el aprovechamiento de sinergias mediante el establecimiento de una alianza multidisciplinaria, participativa y dinámica que se encargue de establecer, desarrollar y adecuar un plan de acción enfocado a abatir las barreras y los retos científicos y tecnológicos que enfrenta el país para el aprovechamiento sostenible de la energía eólica. Además, desarrollar una cartera de proyectos estratégicos específicos derivados de este plan; expandir y fortalecer las capacidades de investigación científica y tecnológica; fomentar la formación de recursos humanos especializados; y vincular el ámbito académico con el industrial.

El CEMIE-E opera bajo la guía de un Grupo Directivo conformado por miembros representantes de las instituciones y empresas que integran el consorcio. Cuenta además con un Grupo Operativo encabezado por los responsables técnico y administrativo del propio Centro, ambos pertenecientes al IIE; un Equipo de Ejecución de Proyectos Estratégicos conformado por los líderes técnicos administrativos de los proyectos que se realizan en el CEMIE-E; y un equipo de investigadores líderes. El Centro (del cual se puede encontrar mayor información en el sitio *web* del IIE) se encuentra en su etapa de arranque, por lo que se anticipa que conforme madure tendrá un impacto significativo en el desarrollo eólico de México.

El proyecto AEM

Recientemente, los gobiernos de Dinamarca y México firmaron un acuerdo de colaboración donde se incluyen temas relacionados con la energía, particularmente la elaboración del Atlas Eólico Mexicano (AEM). A finales de 2015 y gracias a la vasta trayectoria con que cuenta el Instituto en esta área de investigación, el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía confirió a la GER-IIE la coordinación de este proyecto, en el que también colabora la UNAM, la CFE y la Universidad Técnica de Dinamarca. El objetivo es elaborar un atlas nacional de viento que permita identificar sitios para el aprovechamiento de la energía eólica en pequeña, mediana y gran escala.

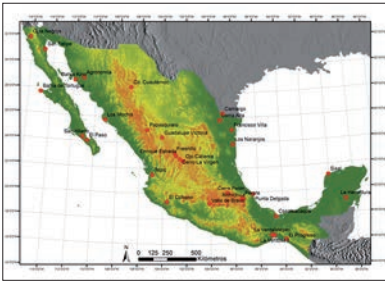
Una de las ventajas que tendrá el AEM respecto de la cartografía eólica que generó la GER-IIE en años pasados es, por ejemplo, la mejor resolución de los mapas anuales de viento. Actualmente es de 10 km aproximadamente, y el nuevo atlas tendrá resoluciones entre 3 km y 5 km, y en las zonas con mayor potencial tendrá resoluciones de 200 m. También se mejorará la calidad de los datos simulados, ya que se dispondrá de una serie de estaciones anemométricas de referencia para realizar los ajustes. Las estaciones forman parte de este proyecto.



El AEM será una plataforma de trabajo dinámica, lo que significa que tendrá la posibilidad de incorporar nueva información anemométrica que se genere mediante modelaciones o como producto de mediciones en campo, siempre y cuando éstas cumplan con estándares internacionales. También contempla la incorporación de otras instituciones que estén interesadas en colaborar, y la participación de estudiantes e investigadores que requieran aprovechar la información y resultados que se vayan generando durante el desarrollo del proyecto.

Los métodos y modelos utilizados en la elaboración del AEM, así como los datos medidos por la red de estaciones y las bases de datos modeladas, serán del dominio público. Para ello el IIE creará una plataforma informática basada en los estándares del INEGI, que contará con un Sistema de Información Geográfica desde el cual se podrán realizar consultas y descargar datos en un esquema gratuito.

Se espera que el AEM contribuya al fomento de inversión, tanto pública como privada, para el desarrollo de proyectos de energía eolieléctrica, ya sea para grandes consumidores o para favorecer a las comunidades que aún no cuentan con el servicio de energía eléctrica, que generalmente es consecuencia de encontrarse muy alejados de las redes eléctricas. También se tiene la perspectiva de que en sitios no poblados podrán desarrollarse proyectos productivos al disponer de energía limpia y a precio razonable.



Este proyecto se desarrollará en tres años (2016-2018) y sus resultados brindarán información detallada del potencial energético del recurso eólico nacional, lo cual concuerda con las estrategias y líneas de acción transversales del Plan Nacional de Desarrollo en cuanto a llevar a cabo políticas públicas que eliminen obstáculos que limitan el potencial productivo de los ciudadanos y las empresas.

El AEM está alineado al Programa Sectorial de Energía en cuanto a optimizar la operación y expansión de infraestructura eléctrica nacional conforme al incremento de la demanda, incorporando energías limpias, externalidades y diversificación energética.

El proyecto también concuerda con los objetivos fundamentales de la Estrategia Nacional de Energía, entre los que se encuentra modernizar y fortalecer a la CFE, contar con un mayor abasto de energéticos a mejores precios, impulsar el desarrollo con responsabilidad social y protegiendo al medio ambiente, atraer inversión al sector energético mexicano para impulsar el desarrollo del país, y reducir las barreras para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica que permitan aprovechar recursos renovables, dando certidumbre a la transición energética sustentada en bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Cabe destacar que los resultados del AEM también están de acuerdo con el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, el cual considera el aumento de la capacidad instalada y la generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía.

Energía solar

Los primeros pasos

Muy al inicio en la vida de la GER-IIE, las actividades en el Instituto para el aprovechamiento de la energía solar se limitaban a la construcción y prueba de calentadores de agua. Ello en el contexto del proyecto denominado Sistemas Energéticos Integrados, cuya idea básica era utilizar las fuentes locales de energía de manera integrada a las actividades productivas de comunidades remotas, mediante un enfoque sistémico. Los calentadores eran de construcción artesanal, de tal forma que pudieran ser reproducidos en ese tipo de comunidades, y estaban destinados principalmente a suministrar agua caliente para el aseo personal y para los digestores anaerobios que irían a producir biogás para usos domésticos y comunitarios. Estamos en el IIE de la segunda mitad de la década de 1970.

Por ese mismo tiempo el Instituto decide, de común acuerdo con la Gerencia de la División Baja California de la CFE, emprender un proyecto de refrigeración solar como medio para disminuir el consumo eléctrico en casas habitación en la Ciudad de Mexicali. En la época de verano la temperatura ambiente en esa ciudad suele alcanzar los 50°C, lo que obliga a la población a un uso intensivo de aire acondicionado para lograr niveles de confort aceptables. Ello significa altos consumos eléctricos, montos elevados a pagar por el usuario, y la necesidad de la CFE de mantener suficiente capacidad de generación para satisfacer la demanda eléctrica que alcanza su máximo en esa época, ya que el sistema eléctrico en la parte norte de Baja California era, y sigue siendo, un sistema aislado de la red eléctrica nacional.

En 1980 se inició el proyecto consistente en la instalación de una unidad de refrigeración por absorción con capacidad de 2 toneladas de refrigeración (7 kWt). El sistema total estaba integrado por 50 m² de captadores solares planos, un tanque de almacenamiento de 1650 litros para el agua caliente, una torre de enfriamiento y una unidad de respaldo térmico. El proyecto se llevó a cabo conjuntamente por la GER-IIE y el Centro de Investigación en Materiales de la UNAM. El proyecto tenía por objetivos conocer el potencial del aire acondicionado solar como sustituto de sistemas convencionales de refrigeración, así como su impacto sobre la demanda eléctrica de verano, los costos y beneficios de su implementa-

ción masiva, y los límites tecnológicos, institucionales y sociales al despliegue masivo de esta tecnología.

A pesar de tratarse de una aplicación novedosa de la tecnología de refrigeración por absorción (fue el primer proyecto de su género en América Latina), el proyecto demostró ser técnicamente factible, pero socialmente inviable: el espacio requerido para la instalación de los colectores solares y para el resto del sistema excedía las dimensiones del lugar disponible en la mayoría de las viviendas de interés medio y social, identificadas como el objeto de estudio. Desde entonces y hasta la fecha, el Gobierno del país ha optado por sostener subsidios crecientes al consumo eléctrico de la población en la Ciudad de Mexicali, acompañados por algunas medidas de mitigación como el aislamiento de techos y paredes de las viviendas, y normas más exigentes para la eficiencia de los equipos convencionales de aire acondicionado.

Tecnología termosolar a concentración

Cuenta la tradición que en el año 213 antes de Cristo Arquímedes utilizó un conjunto de espejos con los que concentró los rayos solares sobre los barcos de la flota romana que sitiaban la Ciudad de Siracusa logrando incendiarlos. Ya en el siglo XVI, Leonardo da Vinci había ideado concentradores solares mediante el uso de gran número de espejos con la intención de producir vapor de agua para calentamiento industrial. En los siglos XVII y XVIII aparecen las primeras máquinas rudimentarias operadas con energía solar, principalmente en Francia, y en 1878 se demuestra en ese país una turbina operada con energía solar, principio que cuatro años después es aplicado para mover una imprenta.

En los albores del siglo XX surge una variedad de aplicaciones prácticas de la energía solar concentrada y, en 1913, luego de fundar su empresa *The Sun Power Company* el ingeniero norteamericano Frank Schuman construye en Egipto la primera estación termosolar para el bombeo de agua, con lo que se inicia una etapa de entusiasmo por aprovechar comercialmente la energía solar. A mediados de la década de 1970, y como reacción a los estragos causados por el embargo petrolero impuesto por los países árabes, varias naciones industrializadas lanzan programas nacionales en los que se da impulso al desarrollo de la tecnología termosolar moderna. En 1984 se construyó en el desierto de California, Estados Unidos, la primera central comercial de generación eléctrica con energía solar, CEGS-1 (*Solar Energy Generating System*) de 14 MW, a la que en un período de seis años le siguieron 6 plantas con capacidades de 30 MW cada una, y dos más de 80 MW, para una capacidad total de 354 MW.

En la actualidad los sistemas termosolares para la generación de electricidad constituyen un sector industrial en crecimiento, con tecnología basada en los mismos principios ya establecidos desde siglos atrás, pero con la diferencia de que ahora se incorporan materiales modernos, dispositivos informáticos y electrónicos, y mejores prácticas de ingeniería. La tecnología termosolar a concentración muestra una tasa de crecimiento anual más modesta que otras tecnologías de energías renovables para generación eléctrica, pero aun así, se cuenta ya en el mundo con una capacidad instalada cercana a 5,000 MW, ubicada principalmente en España y los Estados Unidos, aunque con aplicaciones importantes en los Emiratos Árabes, India, Egipto y Marruecos.



En México ha habido hasta ahora poco interés por aplicar la tecnología termosolar a concentración para la generación de electricidad, por lo que las actividades del IIE por muchos años se confinaron a dar seguimiento a lo que estaba pasando en el mundo, y a realizar diversos estudios acerca de lo que podría implicar la adopción de esta tecnología para el sector eléctrico nacional y la industria en general, en términos del uso de los principales insumos para la construcción de estas plantas: acero, vidrio y cemento. La colaboración internacional fue el medio más expedito para conocer a fondo la tecnología y asimilar las prácticas ingenieriles entonces en desarrollo. Investigadores de la GER-IIE tuvieron oportunidad de participar en forma activa en algunos de los primeros proyectos en este campo, como el desarrollo del primer receptor solar de cavidad por parte del consorcio EPRI-BOEING en los Estados Unidos, el proyecto GAST de ciclo Brayton por la Asociación de Industrias Eléctricas de España (ASINEL), y la re-potenciación de la central Newman de la empresa El Paso Electric en Texas. Esto a la vez materializó la posibilidad de realizar largas estancias en centros de reconocido prestigio como los Laboratorios Nacionales Sandía en los Estados Unidos, la Agencia Aeroespacial Alemana, DLR (*Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*), y la Plataforma Solar de Almería en España.

No fue sino hasta el año 2010, una vez que se tuvo formalizado el convenio con la SENER para llevar adelante el Plan Piloto para el Desarrollo de las Energías Renovables, cuando se emprendieron en el Instituto trabajos para el desarrollo de dos tecnologías de concentración solar: una conocida como plato parabólico, o disco parabólico (*parabolic dish*), cuyo principio de funcionamiento es similar al desarrollado en Francia para mover la imprenta referida anteriormente; y la otra conocida como canal parabólica (*parabolic trough*), similar en concepto a la tecnología utilizada por el ingeniero Frank Schuman en su planta de bombeo de agua en Egipto.

El desarrollo del plato parabólico en el IIE tuvo su motivación en la existencia de un gran número de comunidades asentadas en zonas desérticas o semidesérticas del país y sin acceso a electricidad. Se trata de un captador solar de 8 metros de diámetro que sigue los movimientos aparentes del sol y es capaz de concentrar 650 veces la intensidad de la radiación solar, lo que permite producir en su foco temperaturas cercanas a los 700 grados Celsius, lo que hace posible generar electricidad mediante una máquina de Ciclo *Stirling* de 10 kW de potencia. Un equipo de esta naturaleza puede ser útil para desalar agua de mar en zonas costeras, producir frío para preservar productos perecederos, así como para otras aplicaciones productivas, o bien para mejorar la calidad de vida de los habitantes de esas poblaciones al destinar

la electricidad producida a labores de educación, salud y entretenimiento. El desarrollo de este aparato no ha sido fácil, pues se ha visto interrumpido en múltiples ocasiones, principalmente por falta de presupuesto. Se cuenta ya con un prototipo funcional a plena escala. Empaquetar la tecnología e introducirla a las comunidades son dos de los retos que tienen por delante los investigadores que empeñosamente han trabajado en su desarrollo.

El Instituto ha corrido con mejor suerte en el desarrollo de la tecnología de canal parabólica, pues pese a las interrupciones motivadas por la falta de presupuesto, ha sido posible cerrar el ciclo hasta transferirla a una empresa nacional. Sin embargo, el objetivo del desarrollo no fue la producción de electricidad sino la producción de calor para procesos industriales. Estudios realizados por el propio IIE con apoyo de los fondos CONACYT indican que industrias como la textil, las de alimentos, bebidas y medicamentos, consumen grandes cantidades de calor para sus procesos, a temperaturas por debajo de 200 grados Celsius. Y para ello dependen fundamentalmente del suministro de gas, natural o LP, con la volatilidad de precios característica de estos combustibles. Estos sectores ofrecen un nicho de oportunidad interesante para el uso de la energía solar. Por otro lado, como ya se mencionó, poco ha sido el interés del sector eléctrico nacional por utilizar tecnologías termosolares a concentración para sus propósitos.

El desarrollo de la tecnología de canal en el Instituto inició en el año 2000 con la construcción de un módulo de prueba que se instaló en los terrenos que ocupan las oficinas del Sindicato del propio IIE. Este módulo permitió resolver varios de los problemas inherentes a un primer diseño y comenzar a promover aplicaciones piloto en el seno de algunas industrias. La armadora de autos Nissan fue la primera en aplicar la tecnología del Instituto y ganar experiencia en su operación. El uso que se le dio al calor solar producido fue para elevar la temperatura del agua de los baños del personal, aunque en el horizonte, una vez convencidos de la eficacia del proceso, consideraban destinar el agua caliente para remover la grasa de piezas metálicas previo a la aplicación de pintura. Muchas oportunidades de aplicar la tecnología IIE se hicieron patentes con los estudios financiados por CONACYT, pero pocas pudieron materializarse. La tecnología finalmente se licenció a una empresa del sector privado nacional para su fabricación con fines comerciales, pero el desarrollo continúa para mejorar la tecnología. Actualmente, tanto el prototipo de plato parabólico como la versión más avanzada del canal parabólica se encuentran instalados en los terrenos de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos, en el Municipio de Juitepec, lo que da oportunidad para que jóvenes estudiantes se familiaricen con la tecnología y se involucren en su desarrollo.

Tecnología fotovoltaica

Es fácil asociar la aparición de la tecnología fotovoltaica con la era espacial ya que las primeras aplicaciones de esta tecnología se hicieron a mediados del siglo XX para dotar de electricidad a los satélites artificiales lanzados tanto por la Unión Soviética como por los Estados Unidos. En realidad, la tecnología es mucho más antigua. Se sabe que fue el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel quien en 1839 descubrió que algunos materiales transforman la luz en corriente eléctrica. Pero no fue sino hasta casi cincuenta años después, en 1887 que se fabricó la primera celda fotovoltaica. La base teórica del efecto fotoeléctrico se desarrolló durante los últimos años del siglo XIX y principios del siglo XX, con una contribución importante de Albert Einstein en 1905. La celda solar moderna fue patentada por un ingeniero estadounidense en 1946, pero la era moderna de la tecnología inicia en 1954 con los desarrollos realizados por investigadores de los laboratorios Bell que contribuyeron a la fabricación de la primera celda solar comercial.

El desarrollo de la tecnología fotovoltaica moderna ha requerido una intensa labor de investigación científica y aplicada, realizada principalmente en países industrializados, cuyos resultados están a la vista: nuevos materiales para producir celdas y módulos fotovoltaicos más eficientes, lo que ha resultado que la tecnología pase de menos del 1% de conversión de la luz solar a electricidad en sus inicios, a más del 25% en la actualidad; y productos de más larga vida y menores costos de produc-



ción gracias a procesos automatizados de manufactura. A su vez, las políticas de estímulo al desarrollo industrial en esos países han impulsado la creación de grandes empresas y un mercado que crece a ritmos solo comparables con la tasa de crecimiento de los teléfonos celulares y las computadoras personales.

Siendo la tecnología fotovoltaica de naturaleza modular, sus aplicaciones se dan en el rango desde los miliwatts (en relojes, calculadoras y otros dispositivos de uso personal) hasta los megawatts en grandes plantas de generación de potencia eléctrica, cuya capacidad global instalada hasta finales del año 2014 fue de 183,000 MW, casi tres veces la capacidad total de generación eléctrica con que contaba México en ese año.

La participación del Instituto en el mundo fotovoltaico ha estado siempre encaminada a las aplicaciones de la tecnología, tanto en sitios remotos como integradas a la red eléctrica. El énfasis de los trabajos de la GER-IIE está en la integración de sistemas en los que se conjuntan otros elementos (además de las celdas y los módulos fotovoltaicos) de cuya correcta interacción dependen la eficiencia, la confiabilidad y el costo de la electricidad generada. En México, la investigación científica y aplicada sobre celdas y módulos fotovoltaicos ha residido históricamente en instituciones de corte académico, notablemente en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) y en lo que ahora es el Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Cabe mencionar que a finales de la década de 1970 el CINVESTAV ya contaba con un proceso piloto desarrollado localmente para la fabricación de celdas y módulos fotovoltaicos cuyos productos fueron aplicados en programas de telefonía rural e iluminación de albergues para niños indígenas en varias regiones del país. Sin embargo, ese esfuerzo no materializó en una industria nacional, tal vez porque se adelantó a su época, o por la falta de un plan nacional para el desarrollo de la tecnología.

Electrificación rural

A principios de la década de 1990, las aplicaciones de la tecnología fotovoltaica para electrificación rural tuvieron un gran auge en México, principalmente gracias al financiamiento entonces destinado al programa PRONASOL por el Gobierno Federal en turno (programa que en las siguientes administraciones cambiaría de nombre sucesivamente a PROGRESA, OPORTUNIDADES, etc.). Se estima que en los primeros cuatro años de esa década se instalaron en el país alrededor de 24,000 pequeños sistemas fotovoltaicos para iluminación doméstica y otros servicios en comunidades remotas sin acceso a la red eléctrica en varias regiones del país. También se instalaron algunos sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diésel de mayor capacidad para alimentar minirredes eléctricas en comunidades de mayor tamaño, igualmente alejadas de la red. Aunque con altibajos en su dinámica, la actividad continuó durante varios años y se extendió casi a todo el territorio nacional. Es difícil saber en total cuántas instalaciones fotovoltaicas se hicieron, ya que con el cambio en la legislación para el ejercicio presupuestal correspondiente a los municipios, muchos ayuntamientos tomaron en sus manos la dotación de los equipos a las comunidades.

La dinámica del programa mexicano llamó la atención de organismos internacionales, como el Banco Mundial y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, así como de gobiernos de otras naciones. Por aquellos tiempos se hablaba de que había en el mundo más de dos mil millones de personas sin acceso a electricidad de las redes eléctricas na-





cionales, lo que llevó a tales organismos a establecer la ampliación de la cobertura eléctrica global como una de las Metas del Nuevo Milenio que se acercaba; pero también hizo patente la importancia de contar con metodologías para la implementación masiva de los equipos, especificaciones técnicas y laboratorios de pruebas para asegurar la calidad de los mismos, así como recursos humanos calificados para realizar las tareas técnicas y no técnicas implícitas en este nuevo esquema.

A solicitud y por contrato con la Unidad de Electrificación de la Sub-Dirección de Distribución de la CFE, investigadores de la GER-IIE se dieron a la tarea de crear la infraestructura técnica que los programas requerían para su correcta implementación: metodologías de implementación, guías de diseño e integración de sistemas, protocolos de prueba de equipos y sistemas junto con el correspondiente laboratorio para su aplicación, herramientas computacionales para el seguimiento en campo y evaluación de las instalaciones, un sistema de información geográfica para el acopio ordenado de la información, y material didáctico para la formación de recursos humanos. Muchos de estos elementos fueron aplicados en forma sistemática por primera vez en el mundo durante el proceso de electrificación de las nuevas comunidades de El Sabino, Playa Golondrinas y otras a donde se habían reubicado las poblaciones de localidades del mismo nombre que fueron inundadas debido a la construcción de la presa de Agua Milpa en el Estado de Nayarit. Durante varios años los investigadores de la GER-IIE viajaron por el país apoyando

técnicamente la implementación de los proyectos e impartiendo cursos sobre el tema a personal de CFE, de gobiernos estatales y municipales, y de organismos tales como el entonces Instituto Nacional Indigenista (ahora Comisión para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas).



La experiencia ganada en el curso de estas actividades se plasmó en artículos que se publicaron en libros y revistas nacionales e internacionales, algunos de los cuales aún hoy en día son fuente de consulta, lo que dio notoriedad a las actividades del IIE en el tema. De ahí que durante un largo período no faltara la presencia invitada del Instituto en foros internacionales especializados y que por cerca de seis años la GER-IIE tuviera la coordinación internacional de la Red Iberoamericana de Electrificación Rural del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED-D), lo que resultó en un capital relacional de gran valor para el IIE a lo largo de toda América Latina.



Interconexión a red

Las predicciones de que el principal mercado de la tecnología fotovoltaica sería en aplicaciones en sitios remotos sin acceso a la electricidad convencional, tales como las estaciones repetidoras de telecomunicaciones y los proyectos de electrificación rural, dejaron de tener vigencia a partir del año 1995 cuando gobiernos y empresarios de algunos países se percataron del potencial valor de esta tecnología en el entorno urbano e industrial. Fue Alemania la primera economía en dar impulso a este emergente mercado con su proyecto de instalar mil techos solares con sistemas fotovoltaicos interconectados con la red eléctrica, cuyas metas se incrementaron a cien mil techos solares gracias a la aceptación que entre la población alemana tuvo tal programa. España no se quedó atrás y mediante un Decreto Real estableció uno de los mecanismos económicos más agresivos en su momento para fomentar entre su población el uso de ésta y otras tecnologías de energías renovables; estrategia que años después se tornaría pernicioso para su economía y le obligó a dar marcha atrás. En la práctica, las estrategias de ambos países, y otras similares como en el caso japonés, estuvieron motivadas en la necesidad de abrir e impulsar el crecimiento de sus mercados locales para al mismo tiempo fortalecer a sus empresas nacionales de manufactura de celdas y módulos fotovoltaicos. Estas fueron estrategias exitosas hasta que llegaron las empresas chinas a controlar los mercados globales y empezaron a aparecer las grandes centrales fotovoltaicas multimegawatt, gracias también a la disminución de costos de los materiales y los procesos de fabricación. Actualmente la capacidad total fotovoltaica instalada en el mundo es superior a 183,000 MW.

México incursionó en el mundo de las aplicaciones fotovoltaicas interconectadas con la red eléctrica en el año de 1997 con los estudios pioneros del Instituto. En ese año, investigadores de la GER-IIE instalaron en el propio IIE lo que sería el primer sistema fotovoltaico conectado a red en América Latina. Se trató de una planta de 1.7 kW que fue construida en la azotea del edificio donde se ubica la dirección ejecutiva y que permitió hacer los primeros ensayos con una instalación fotovoltaica interconectada a la red, gracias a las facilidades otorgadas por la ahora extinta Compañía de Luz y Fuerza del Centro (LyFC). Ocho años después, en 2005, en colaboración con la empresa CONERMEX y mediante una inversión privada, la GER-IIE logró nuevamente el apoyo de LyFC para instalar el primer proyecto fotovoltaico de autoabastecimiento comercial consistente en un sistema trifásico de 30 kW interconectado a la red, el

cual aún abastece parte de la demanda eléctrica de la tienda de productos orgánicos *The Green Corner* ubicada al sur de la Ciudad de México.

En el mismo período, ya con el apoyo de la CFE, los investigadores de la GER-IIE instalaron y estudiaron el comportamiento de instalaciones fotovoltaicas de diversas capacidades interconectadas a la red en edificaciones domiciliarias y municipales de varias ciudades del norte y noroeste del país, principalmente en Mexicali, Baja California; Hermosillo, Sonora; San Pedro Garza García, Nuevo León, y La Paz, Baja California Sur. Con la información procedente de estas instalaciones se integró una rica base de datos que permitió establecer de manera fehaciente los beneficios de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, tanto para el usuario de la electricidad como para el propio sistema eléctrico nacional. De ahí que el Gobierno de Baja California, junto con la Comisión, tomaran la decisión de llevar adelante la iniciativa para construir el primer vecindario fotovoltaico en México, específicamente en la zona conocida como Valle de las Misiones en la Ciudad de Mexicali, consistente en 220 casas con un equipo fotovoltaico de 1 kW cada una y conectadas en forma individual a la red eléctrica. El vecindario fue inaugurado por el presidente de la república a finales de 2006. El Instituto brindó asesoría a ambas entidades para la formulación del proyecto y más adelante, como parte de otro proyecto financiado por el GEF, llevó a cabo, en colaboración con la Universidad Autónoma de Baja California, el análisis *ex-post* de las instalaciones. Se encontró que debido a un conjunto de factores socio-económicos el ambiente en esa zona de Mexicali se degradó al punto que muchos de los equipos fotovoltaicos instalados en el vecindario fueron objeto de robo, vandalismo y otros abusos. El estudio permitió derivar lecciones sobre los factores humanos y sociales que impactan la introducción de nuevas tecnologías.

El involucramiento de la CFE en las acciones antes descritas sirvió para alertar, tanto a la Gerencia de Planeación como al área de Comercialización de la Subdirección de Distribución, sobre la necesidad de desarrollar capacidades propias en previsión de lo que estaba por venir en términos de la apertura del mercado nacional de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Fue así que la Comisión contrató a la GER-IIE para desarrollar las Especificaciones Técnicas que debían cumplir las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica, lineamientos que después del proceso de análisis de rigor se adoptarían como una norma propia de la CFE. Al mismo tiempo, la GER-IIE recibió un contrato para elaborar el material didáctico necesario para impartir

cursos de capacitación relacionados con este tipo de sistemas al personal de la Subdirección de Distribución en todo el país. El material se elaboró y entregó a la CFE, pero los cursos al interior nunca se dieron, pues el proceso de extinción de LyFC cambió las prioridades hacia adentro de la Subdirección de Distribución. Sin embargo, la Comisión autorizó al IIE para que el curso se impartiera, principalmente en el ámbito académico.

Por su lado, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) atenta al devenir mundial en este campo, recibió con beneplácito una iniciativa del Instituto derivada de las experiencias sintetizadas en párrafos anteriores, consistente en implementar en el país un esquema de “Medición Neta” que ayudara a viabilizar la adopción de la tecnología fotovoltaica en los ámbitos domiciliario y comercial. A diferencia de los modelos de *net metering* y *net billing* ya existentes o emergentes en otras economías, el esquema propuesto por el IIE buscó la rentabilidad de los proyectos con base en las tarifas eléctricas aplicables en el sector comercial y en el sector domiciliario de mayor consumo eléctrico (usuarios DAC). Las primeras pláticas sobre el particular entre investigadores del Instituto y funcionarios que llegarían a ocupar altos cargos en la CRE ocurrieron en 2004.

Luego de realizar un conjunto de estudios y análisis necesarios, en 2007 la CRE emitió la primera Resolución en la que se autorizaba a los usuarios domiciliarios a instalar en su propiedad plantas fotovoltaicas conectadas a red con hasta 10 kW de capacidad y hasta 30 kW a los usuarios comerciales en baja tensión. Esta Resolución fue modificada en 2010 para permitir que los usuarios comerciales pudieran instalar en sus negocios hasta 500 kW de paneles fotovoltaicos en media tensión. Mediante una tercera Resolución la CRE autorizó la generación colectiva de electricidad con instalaciones de energía renovable de hasta 30 kW de capacidad y 1 kV de tensión. Estas resoluciones constituyen un instrumento de política energética que permiten a los consumidores generar su propia electricidad e inyectar a la red sus excedentes, pagando solo la diferencia entre lo que toman de la red y lo que le inyectan. En estos esquemas la facturación de la electricidad consumida de la red se hace en forma normal y los excedentes inyectados se compensan 1 a 1, permitiendo acumularlos en un banco virtual de electricidad hasta por un año. Cabe notar que en el caso del proyecto del vecindario fotovoltaico de Mexicali, la CFE implementó el esquema de medición neta.

El despliegue masivo de nuevas tecnologías requiere ser acompañado por un proceso que permita identificar y eliminar las barreras, técnicas y no

técnicas, que puedan inhibir su adopción por parte de los potenciales usuarios. Esto sobre todo tratándose de tecnologías con las que los usuarios puedan interactuar, como es el caso de la tecnología fotovoltaica en pequeña escala. A fin de implementar un proceso de esta naturaleza, la GER-IIE ejecutó a lo largo de varios años el proyecto “Pequeños Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red” que contó con financiamiento del GEF y con la colaboración del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Como parte de este proyecto se llevaron a cabo reuniones regionales con diversidad de actores (académicos, empresarios, funcionarios gubernamentales, etc.) quienes contribuyeron a identificar las barreras de mayor impacto y propusieron cursos de acción para removerlas. Mediante este proceso se pudo establecer que la falta de financiamiento es una de las principales barreras a eliminar para viabilizar la aplicación masiva de la tecnología fotovoltaica de pequeña escala en el país.

Con el fin de aportar elementos conducentes a mitigar y contribuir a eliminar esta barrera, la GER-IIE en colaboración con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la organización *Latin America Regional Climate Initiative* (LARCI), elaboró y sometió a consideración del Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTEASE) del Gobierno Mexicano, una propuesta solicitando un recurso económico superior a 100 millones de pesos a ser utilizado para catalizar financiamiento proveniente de la banca privada y oficial para que fluya el recurso que permita la realización de proyectos de generación eléctrica distribuida con energías renovables. La propuesta fue aprobada a fines del año 2015.

El proyecto de pequeños sistemas fotovoltaicos permitió también elaborar guías de usuario para fomentar la aplicación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, y dictar cursos sobre sistemas utilizando el material didáctico originalmente elaborado para la CFE. Varias instituciones del país sirvieron como sede de estos cursos, habiendo sido el campus Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana la primera. El IIE continúa impartiendo en forma regular este curso en sus instalaciones de Cuernavaca y ha desarrollado tecnología que permite realizar de manera segura todas las pruebas requeridas para la interconexión a red de las instalaciones fotovoltaicas. El equipo que sirve para este propósito lleva el nombre de “PROFESOL”, sobre el cual el Instituto tiene ya solicitada una patente y una marca.

El estanque solar

Muchos fenómenos de la naturaleza nos dan pauta e inspiración para el desarrollo de nuevas tecnologías. Un ejemplo entre muchos otros es el material adhesivo Velcro, ahora utilizado para un gran número de aplicaciones, incluso en prendas de vestir, que se desarrolló imitando las características de algunos cardos naturales que en los campos se adhieren instantáneamente al pelo de los animales o a la ropa de los humanos. Otro ejemplo en el área de las energías renovables es una tecnología que mimetiza lo que ocurre en algunos estuarios donde la densidad del agua aumenta con la profundidad debido a que la fuerza de la marea es baja mientras la del río que ahí desemboca es alta. Esta conformación permite un calentamiento mayor en el agua del fondo debido a la acción de los rayos solares. Este fenómeno es algo común, pues en el mundo existen muchos cuerpos naturales de agua estratificados por salinidad. Tal es el caso del llamado *Solar Lake*, en la península Sinaí de Egipto. En nuestro país este fenómeno se puede observar en la laguna Xel-Ha en el Estado de Quintana Roo.

La tecnología que aprovecha este fenómeno se conoce con el nombre de “estanque solar” o “poza solar” (*solar pond*, en inglés), y fue primero desarrollada en Israel, donde las investigaciones sobre el tema datan de 1960 y desembocan en 1980 en una planta piloto a orillas del Mar Muerto. Esta planta consistía en un estanque solar con una superficie de 75,000 m², el cual alimentaba calor a una máquina de 150 kW de capacidad de generación eléctrica. Con base en el éxito de esta primera instalación, en 1983 se construyó también a orillas del Mar Muerto lo que



hasta ahora ha sido la planta de estanque solar más grande del mundo, con un estanque de 250,000 m² de superficie y una máquina de 5 MW de potencia eléctrica. En ambos casos los proyectos fueron desarrollados por la compañía *Ormat Turbines*, empresa israelí con la que el IIE tuvo una relación de colaboración en el campo geotérmico de Los Azufres.



El principio físico que permite capturar los rayos del sol en los estanques solares se basa en el hecho de que el agua salada en el fondo es más pesada que el agua dulce de la superficie y, dado que su densidad disminuye al incrementar su temperatura, el reto tecnológico consiste en no dejar que el agua salada se vuelva más ligera que el agua dulce, evitando así que el calor se pierda por convección hacia la superficie del estanque. Para generar electricidad el agua caliente del fondo del estanque se alimenta como fuente de energía a una máquina de ciclo Rankine Orgánico donde se evapora un fluido de bajo punto de ebullición, el cual es a su vez utilizado para mover una turbina.

Las actividades del Instituto en estanques solares iniciaron como por curiosidad científica con estudios teóricos sobre los fluidos doblemente estratificados (sal y calor), pero sin excluir la posibilidad de eventualmente hacer algo práctico en el tema, considerando que en México existen muchos sitios que cuentan con grandes cantidades de sal y aguas salobres. En esos tiempos había mucha actividad en la construcción de los nuevos edificios del IIE. Para fines de 1982, la estructura del edificio 27 había sido ya levantada y en su lado norte quedaba sin uso un tanque rectangular hecho de mampostería, de aproximadamente 1.5 m de profundidad y 12 m² de superficie, que los trabajadores utilizaban como reservorio de agua para las obras. Usando sal de mesa y agua de la llave investigadores de la GER-IIE construyeron un gradiente salino en el interior de ese tanque, con lo que empezó una aventura interesante en el fascinante campo de los estanques solares.

El tanque empezó a ganar temperatura y en cosa de algunas semanas el agua del fondo era lo suficientemente caliente como para soportarla al tacto. La temperatura del fondo del tanque continuó subiendo a lo largo de los siguientes meses pero a la llegada de la temporada de lluvias del siguiente año el gradiente salino en el tanque se erosionó con la consecuente pérdida de calor. Fue de esta forma que se demostró por primera

vez en México el concepto del estanque solar, pero fue también de esta forma que de manera fortuita se conoció que la lluvia es dañina para la tecnología. Hasta esa fecha los estanques solares, en su mayoría experimentales, que se reportaban en la literatura habían sido construidos en regiones desérticas del mundo: el Mar Muerto en Israel, *Alice Springs* en Australia, El Paso Texas en Estados Unidos, Salta en Argentina, donde la lluvia es muy escasa.

Motivados por la experiencia con el tanque del edificio 27, a principios de 1986 se arrancó un proyecto de investigación y desarrollo tecnológico cuya meta fue lograr el dominio de la tecnología de estanques solares mediante la construcción de una planta demostrativa de 1 MW, lo que debía ser integrado en un paquete tecnológico que permitiera replicar la tecnología en regiones del país con las condiciones climáticas apropiadas. La meta intermedia era la construcción de una planta piloto de 10 kW con un estanque de unos mil metros cuadrados.

Ya en el marco de este proyecto los investigadores se adentraron más en el estudio de la tecnología y los fenómenos que la gobiernan. Se desarrollaron entonces modelos para evaluar la influencia de parámetros meteorológicos, como la lluvia y el viento, sobre el comportamiento de lo que se conoce como la “zona de gradiente” de los estanques solares salinos (hay también estanques solares no-salinos, pero la GER-IIE no incursionó en ese campo). Así mismo, se desarrollaron programas de cómputo para dimensionar, analizar y simular estanques solares y los diferentes componentes de las plantas eléctricas basadas en esta tecnología. Para profundizar en el conocimiento básico de la estructura y dinámica del gradiente salino de los estanques, así como el efecto de la lluvia sobre su superficie, se improvisó en la azotea del edificio 24 de la Gerencia de Geotermia, un laboratorio en el que se construyeron pequeños modelos de estanques estratificados y dispositivos para producir lluvia artificial sobre los mismos, en los que se realizaron experimentos sin precedente a nivel mundial.



Al mismo tiempo se inició la construcción de un estanque de 1000 m² en terrenos del Instituto Tecnológico de Zacatepec, mediante un convenio con esta institución, y se hicieron las gestiones necesarias para obtener salmuera saturada de cloruro de sodio cuyo suministro quedó asegurado

mediante una donación que ofreció una empresa veracruzana ubicada en la localidad de Jáltipan, Veracruz. Sin embargo, ya con la obra física del estanque casi concluida, se corrió la voz entre los agricultores de la región cercana al tecnológico de que el estanque representaría un riesgo de contaminación de los terrenos destinados al cultivo de la caña de azúcar. El rumor llegó a los medios y no fueron suficientes las explicaciones y demostraciones sobre las medidas implementadas en la construcción del estanque para prevenir cualquier filtración de agua salada, por lo que el tema se convirtió en un asunto socio-político que llevó finalmente a la suspensión del proyecto en ese lugar.

La alternativa que se encontró para poder continuar con el desarrollo de la tecnología fue reubicar el proyecto a las instalaciones para almacenamiento de petróleo crudo con que cuenta Petróleos Mexicanos (PEMEX) en la localidad de Tuzandepetl en el Estado de Veracruz. En esas instalaciones el petróleo se almacena en cavernas subterráneas construidas en enormes domos salinos, las cuales, por razones de estabilidad estructural, no pueden estar nunca vacías. Se mantienen llenas de salmuera saturada cuando no hay petróleo que almacenar, pero conforme se envía petróleo al almacén un volumen equivalente de salmuera se extrae y se envía a extensas lagunas en la superficie. La operación inversa se hace cuando se extrae petróleo del almacén para cargar los barcos que habrán de llevarlo a su destino. Sin mayores preocupaciones por el lado ambiental, y gracias a la anuencia de la Dirección General de PEMEX Exploración y Producción, en septiembre de 1991 dio inicio la construcción en ese sitio, al lado de las grandes lagunas de salmuera, un estanque solar con 3,500 m² de superficie efectiva de captación solar, que fue complementado con una máquina de ciclo Rankine orgánico de 10 kW de capacidad. El interés de PEMEX en el proyecto residía en demostrar la factibilidad de la tecnología con miras a la posibilidad de autoabastecerse de electricidad mediante plantas de estanque de gran capacidad, para las intermitentes operaciones de bombeo del proceso de almacenamiento de crudo. Los estanques solares se caracterizan por su gran capacidad de almacenar energía y la rapidez de respuesta para entregarla bajo demanda.

Aun cuando la viabilidad técnica del estanque fue demostrada exitosamente, el interés de PEMEX se enfrió al cambio de funcionarios de esa paraestatal y el proyecto del Instituto para el desarrollo de la tecnología llegó prácticamente a su fin, no sin antes promover su uso en otras empresas. La empresa Exportadora de Sal, S.A. (ESSA), ubicada en

Guerrero Negro, Baja California Sur, es la mayor productora de cloruro de sodio a partir de agua de mar y cuenta con grandes cantidades de salmuera e inmensas extensiones de terreno desértico. En su momento ESSA tenía planes de ampliar su capacidad de producción y diversificar sus productos extrayendo otras sales existentes en el agua de mar, para lo cual requería de calor que el estanque solar le podría proporcionar. Hasta donde se supo, la empresa no pudo obtener los permisos ambientales para ampliar su producción, y el uso de la tecnología de estanques solares quedó solamente en una intención. También en buena intención quedó el posible uso de estanques solares en la empresa Química del Rey, ubicada en el desierto de Coahuila. Ahí se produce sulfato de sodio a partir de salmuera que se extrae del subsuelo y cuyo procesamiento es intensivo en el uso de calor y electricidad. Por aquel tiempo la empresa se abastecía para sus operaciones de combustóleo transportado por ferrocarril a lo largo de una vía exclusiva de muchos kilómetros, con los costos inherentes y su correspondiente impacto en el costo del producto. Finalmente los directivos de la empresa optaron por extender las líneas eléctricas hasta el sitio de la planta, con lo que las gestiones para construir una planta de estanque solar se derrumbaron, aunque en este caso sí fue posible construir en el sitio un pequeño estanque demostrativo que resultó de gran interés para algunos directivos de la empresa.

A lo largo de ese peregrinaje se tuvieron logros colaterales importantes. Tal es el caso del Laboratorio Termodinámico de Baja Entalpía que fue construido en lo que ahora es el edificio 35, gracias a fondos concurrentes del Gobierno Mexicano y la Unión Europea. Este laboratorio contaba con una caldera y una máquina de refrigeración, para funcionar como fuente y un sumidero de calor, respectivamente, y que junto con una diversidad de equipos e instrumentos permitía el desarrollo y prueba de tecnología para el aprovechamiento de calor de baja temperatura para la generación de electricidad. Ahí se trabajó empeñosamente en colaboración con el *Solar Energy Research Institute* (SERI, ahora *National Renewable Energy Laboratory*, NREL) de los Estados Unidos en el desarrollo de un intercambiador de calor por contacto directo para ser utilizado en la recuperación de calor de estanques solares. En otra actividad derivada del interés por conocer el comportamiento de la zona estratificada bajo los efectos de la lluvia y del viento, se desarrolló un instrumento portátil y sumergible con los mismos principios de la técnica



de estudio de sombras (*shadowgraph*) utilizada en las investigaciones de dinámica de fluidos. El instrumento desarrollado en el IIE resultó de interés para los investigadores de estanques solares de la Universidad de Texas en El Paso, Estados Unidos, por lo que mediante un convenio de colaboración se envió a esa universidad para su uso, en tanto se construía el estanque del Instituto.

Los congresos nacionales e internacionales constituyen un medio muy útil para la difusión del conocimiento. Permiten presentar a otros los avances que uno tiene y uno a la vez enriquecerse con el conocimiento de otros. Cuando las actividades sobre estanque solares en el IIE dieron inicio, ya investigadores en otras partes del mundo habían logrado avances significativos, por lo que con apoyo de varios organismos, incluido el CONACYT y la Dirección General de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (ahora SENER), la GER-IIE organizó en 1987 la conferencia *International Progress in Solar Ponds*. En esta reunión participaron 47 delegados de doce países, incluyendo a Israel, Australia, India y Estados Unidos, que entonces lideraban el desarrollo de la tecnología. Esta fue la primera de una serie de conferencias internacionales sobre el tema que posteriormente se celebraron en otros países durante varios años, hasta que llegó un momento en que el entusiasmo por el desarrollo de la tecnología prácticamente se detuvo, tal vez porque los investigadores se movieron a otros campos, tal vez porque la tecnología tiene algo de misterioso que inhibe a los potenciales usuarios, o tal vez porque es difícil que los inversionistas se interesen en comercializar lagunas solamente llenas de agua y sal. Queda por verse si en un futuro no lejano los estanques solares resurgen como alternativa energética.

Minihidráulica

Una *pequeña central hidroeléctrica* está constituida por un conjunto de obras civiles e instalaciones electromecánicas por medio de las cuales se puede aprovechar la energía de pequeñas caídas y corrientes de agua para generar electricidad. Los principios físicos de operación de las pequeñas centrales hidroeléctricas son similares a los de las grandes centrales hidroeléctricas convencionales pero su escala de operación es mucho más reducida. Existen en el mundo varias clasificaciones para denominar a las pequeñas centrales hidroeléctricas. El criterio latinoamericano establece una capacidad instalada menor de 5 MW, mientras que la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUUDI) extiende este límite hasta 10 MW. Ampliando esta clasificación, una *minicentral* hidroeléctrica es una instalación cuya capacidad está comprendida entre 50 kW y 500 kW (100 kW y 2 MW para la ONUUDI), mientras que una *microcentral* hidroeléctrica es una instalación cuya capacidad instalada se encuentra entre 1 kW y 50 kW (o hasta 100 kW de acuerdo a la ONUUDI). La principal diferencia, sobre todo en instalaciones de capacidad menor a 1 MW, es que estas pequeñas plantas se diseñan y construyen con tecnología, materiales y equipamiento poco convencionales. De igual manera, los criterios de operación y mantenimiento son distintos a los que se utilizan en las centrales hidroeléctricas de gran tamaño.

La fuerza del agua ha sido utilizada durante siglos para moler trigo y otros granos, pero fue con la Revolución Industrial, y especialmente a partir del siglo XIX, cuando comenzó a tener gran importancia con la aparición de las ruedas hidráulicas para la producción de energía eléctrica. Británicos y estadounidenses se disputan la paternidad de la primera central hidroeléctrica del mundo, los primeros refiriéndose a una instalación construida en Northumberland en 1880 mientras que los segundos con una instalación construida en *Niagara Falls* en 1879.



La electrificación en nuestro país tuvo sus inicios casi diez años después con la instalación de microcentrales eléctricas, tanto térmicas como hidráulicas. La primera planta hidroeléctrica fue instalada en la localidad de Batopilas, Chihuahua, en 1889. Se trató de una microcentral con potencia de 22 kW. Ya para fines de ese año había en México 6 micro-

hidroeléctricas más con una capacidad promedio de 14 kW por planta. La instalación y operación de micro y minicentrales hidroeléctricas en México continuó hasta principios de la década de 1960, pero luego declinó conforme la demanda eléctrica en el país se incrementó y se optó por la construcción de hidroeléctricas de gran potencia. A partir de entonces, las micro y minicentrales hidroeléctricas fueron relegadas al punto que en la actualidad hay un número importante de instalaciones de este tipo prácticamente abandonadas, a pesar de que el flujo hidráulico sigue disponible en la mayoría de los puntos de aprovechamiento donde se ubican estas instalaciones. Sin embargo, las pequeñas centrales hidroeléctricas representan una opción con excelentes posibilidades de desarrollo y aprovechamiento en nuestro país, dada la existencia de un importante recurso hidráulico. Lamentablemente junto con el abandono de las instalaciones se desvanecieron en el país las capacidades industriales y de ingeniería para la fabricación de las turbinas y el desarrollo de los proyectos.

En el resto del mundo las pequeñas instalaciones generadoras de electricidad también estuvieron relegadas por muchos años, pero en la década de 1970, en medio de las alzas en los precios del petróleo ocasionadas por el embargo impuesto por los países árabes a las naciones industrializadas, vuelven a captar el interés de los desarrolladores de esta tecno-



logía. Varios países industrializados de Europa que en el pasado tuvieron una cantidad importante de este tipo de plantas implementaron programas para el reacondicionamiento de las pequeñas centrales hidroeléctricas abandonadas, incluso para su interconexión con sistemas eléctricos mayores. Este fenómeno de apertura y rescate de pequeñas hidroeléctricas se dio principalmente en países como Noruega, Suecia, Alemania y Austria.

En la década de 1990, Pakistán, Nepal y otros países asiáticos, así como varios países del continente africano, recibieron ayuda de agencias internacionales de desarrollo para la construcción de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos a nivel micro y mini. En el continente asiático resalta el caso particular de China, con un programa muy intenso de construcción que superó 90 mil pequeñas centrales hidroeléctricas con una capacidad total instalada superior a 6,300 MW. Y es en este país donde mediante un acuerdo entre ONUDI y los ministerios de recursos hidráulicos y de comercio de China se estableció en 1994 el Centro Internacional sobre la Pequeña Potencia Hidráulica (ICSHP por sus siglas en inglés).

En América Latina, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) implementó el Programa Regional Latinoamericano de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas para impulsar el desarrollo tecnológico de estas pequeñas instalaciones en el continente y promover condiciones que facilitarían su implantación masiva. Varios países de la región, principalmente Brasil, Colombia, Perú, Panamá, Ecuador y Venezuela emprendieron acciones en este sentido y avanzaron tanto en el rescate como en el desarrollo de nuevos proyectos de mini, pequeñas y microcentrales hidroeléctricas.

En el caso de México, gracias a gestiones realizadas por la Dirección General de Investigación y Desarrollo de la Subsecretaría de Energía, SENER, el IIE obtuvo un financiamiento de OLADE para llevar a cabo la construcción e instalación de una minicentral hidroeléctrica demostrativa en una comunidad rural del país sin acceso a electricidad. El convenio para la ejecución de este proyecto se protocolizó en mayo de 1991 y quedó establecido que la electricidad producida en la minicentral estaría destinada para la comunidad indígena de Tomatlán, población ubicada en el Estado de Jalisco, a unos 100 kilómetros al sur de Puerto Vallarta, la cual en aquel tiempo no tenía acceso a la red eléctrica de la CFE. En tales condiciones, la iniciativa ofrecía una oportunidad para servir como piloto de un modelo de autoabastecimiento eléctrico de comunidades

remotas, esquema que ya se discutía en el preámbulo de la anterior reforma del sector eléctrico nacional que ocurrió en el período 1992-1993.

La iniciativa también representaba una oportunidad valiosa para dar aliento a una tecnología que estaba prácticamente olvidada en el país. Son tres los tiempos en que se puede dividir el proceso de ejecución del proyecto, durante los cuales se vivieron interesantes experiencias y se aprendieron importantes lecciones, que se juzga oportuno y de posible utilidad resumir en este espacio: a) el del diseño y construcción de la turbina; b) el de la ingeniería y habilitación del sitio para instalación de la turbina; y c) el de la instalación y puesta en operación de la minicentral.

Ya en octubre de 1987, en el Instituto se había iniciado un proyecto con miras a desarrollar una miniturbina de 100 kW de potencia. Durante 1988 se completaron los diseños hidráulico, mecánico y eléctrico de la miniturbina, así como el diseño civil de la minicentral y se había construido un modelo a escala de la miniturbina. Ese mismo año investigadores del IIE visitaron por primera vez la población de Tomatlán para realizar estudios de campo necesarios para el proyecto, y en 1990 se tenía listo el proyecto ejecutivo de la minicentral, lo cual ayudó en las gestiones para obtener financiamiento y viabilizó los trámites para la manufactura y adquisición del equipamiento, proceso que concluyó en 1992.

La industria metal-mecánica ha sido de gran tradición en el México moderno. Así lo demuestran las cadenas de manufactura en la industria automotriz y en otras áreas. A pesar de ello, dado que el mercado de las pequeñas, mini y microturbinas hidráulicas prácticamente desapareció en nuestro país en las últimas décadas, no fue posible encontrar empresas que por sí solas pudieran emprender el diseño y la construcción de la turbina. Esa circunstancia llevó al Instituto ejecutar internamente el diseño y, contando con el apoyo de los ingenieros y técnicos del taller mecánico del propio IIE y utilizando además los servicios de pequeños talleres locales de pailería y fundición, se logró fabricar los distintos elementos que integran la turbina.

Este proceso permitió asimilar mucho conocimiento sobre aspectos importantes de la tecnología y su manufactura, y, a la vez, integrar un paquete tecnológico (planos, especificaciones técnicas, tipos de materiales requeridos, etc.) que en su momento pudiera servir para desplantar una industria nacional que reprodujera esta turbina. En el estudio realizado años atrás

sobre el potencial hidroeléctrico de los canales de riego en el noroeste del país se habían identificado varios sitios con un potencial total aprovechable para generar electricidad cercano a 300 MW. Pero, por otro lado, el tiempo que tomó la fabricación de la turbina fue más largo de lo esperado, pues tratándose del primer prototipo había mucho trecho que recorrer en la curva de aprendizaje. Este proceso fue apoyado por consultores internacionales financiados por ONUDI y NRECA (*National Rural Electrification Cooperatives Association*) de los Estados Unidos.

El generador eléctrico fue fabricado por la empresa Potencia Industrial (la misma que desarrolló el aerogenerador Colibrí que fue probado en la estación de El Gavillero) y la empresa IEM fabricó el tablero de control del sistema. Quedaba, sin embargo, un elemento importante pendiente: el regulador de velocidad, equipo cuya función es abrir y cerrar automáticamente las válvulas de entrada de agua a la turbina según lo requieran los cambios de la carga eléctrica que debe abastecer la minicentral. Abordar el diseño y construcción desde cero de este equipo quedó fuera de toda consideración, pues los tiempos para concluir el proyecto se hacían cada vez más cortos. Se optó entonces por comprar el regulador de velocidad a una empresa brasileña que ofrecía comercialmente estos equipos. Si bien los tiempos de entrega parecían razonables, el tiempo que se llevó el proceso de adquisición e importación del equipo a México fue bastante más largo de lo anticipado. Felizmente el equipo llegó y la turbina fue ensamblada con éxito y quedó lista para ser trasladada al sitio donde se debería instalar.



Para la instalación de la minicentral hidroeléctrica se seleccionó el sitio ubicado en la margen izquierda (km. 13+200) del canal principal Tomatlán del Distrito de Riego No. 93 servido por la presa Cajón de Peñas. Ahí se realizaron las obras de toma y colocación de la tubería de presión que llevaría dos metros cúbicos por segundo ($2\text{m}^3/\text{s}$) de agua del canal hacia la turbina ubicada en un nivel 7 metros más abajo. Esta tubería metálica, de 43 metros de largo y 90 centímetros de diámetro fue donada para el proyecto por la Coordinación General de Zonas Petroleras de PEMEX. También se hizo la construcción de la casa de máquinas y la obra que llevaría el agua, después de pasar por la turbina, de vuelta hacia el canal en un punto aproximadamente 70 metros aguas abajo de la sección de toma. Los trabajos correspondientes a la obra civil de la minicentral fueron coordinados, supervisados y financiados por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Una vez construidas estas obras, en 1992 se trasladaron todos los equipos desde la ciudad de Cuernavaca hasta el sitio destinado para la minicentral en Tomatlán. Se colocó la miniturbina en su sitio y se hicieron las instalaciones eléctricas, mecánicas e hidráulicas necesarias, quedando a punto la minicentral para realizar las pruebas pre-operacionales, lo que ocurrió ese mismo año.



Un aspecto importante relativo al aprovechamiento del recurso hidráulico para generar electricidad tiene que ver con los derechos de uso del agua, sobre lo cual tienen mucho que decir las comunidades usuarias que ostentan esos derechos. No es raro escuchar que los usuarios del agua se oponen a la instalación de turbinas hidráulicas so pretexto de que algo le puede pasar al agua, tal vez mermas, contaminación o algo difícil de imaginar. Este no fue el caso en Tomatlán, ya que la comunidad con los derechos sobre el agua era la propia comunidad indígena (que se vería beneficiada con la electricidad producida) y con la cual se hizo una intensa labor para involucrarlos en el proyecto y explicarles el proceso de generación hidroeléctrica. Sin embargo, el problema surgió por el lado de la dotación. La miniturbina fue diseñada para trabajar con un caudal de $2\text{m}^3/\text{s}$ de agua que era la dotación autorizada por la Comisión Nacional del Agua para la comunidad de Tomatlán. Pero el agua que la comunidad recibía era apenas la mitad de dicho caudal debido a que no contaban con la infraestructura de riego suficiente para utilizar todo ese volumen de agua. Pasar los $2\text{m}^3/\text{s}$ por la turbina significaría derramar a la salida casi la mitad sin beneficio alguno.

Luego de largas pláticas (las comunidades indígenas suelen tomar decisiones bajo un mecanismo de participación de todos sus miembros, lo que en ocasiones puede requerir meses de consultas para lograr los consensos, como fue en este caso), FIRCO y la comunidad llegaron a un acuerdo para construir la infraestructura de riego faltante, a fin de que se pudieran tener disponibles los $2\text{m}^3/\text{s}$ de caudal requeridos para la operación eficiente de la minicentral. FIRCO aportaría el material (cemento, arena, etc.) y la comunidad aportaría la mano de obra. Pero tampoco fue fácil para FIRCO conseguir el presupuesto necesario para la compra de los materiales, así que los tiempos siguieron corriendo sin plazo fijo.

Ya en esta etapa del proyecto ocurrió que la CFE construyó la infraestructura necesaria para dotar de electricidad por medio de la red al poblado de Tomatlán, para lo cual extendió las líneas eléctricas a lo largo de 100 kilómetros desde la ciudad de Puerto Vallarta hasta el poblado. Esta obra, por un lado, habilitó la posibilidad de interconectar la minicentral a la red y poder llevar la electricidad al poblado en un esquema de autoabastecimiento, como ahora se conoce; pero, por otro lado, fue necesario realizar las gestiones y los acuerdos correspondientes con la Comisión para el porteo de la electricidad. El esquema de autoabastecimiento eléctrico estaba apenas en embrión en la nueva Ley del Servicio Público de Electricidad, y no existían procedimientos ni reglas claras

sobre lo que se tenía que hacer para lograr los permisos de interconexión. Finalmente, y por tratarse de una comunidad indígena, la CFE permitió la interconexión de la minicentral sin mayores trámites, pero la comunidad de Tomatlán no tenía claro el destino de la misma pues ya contaba con electricidad de la red. Se exploraron entonces varias opciones, como utilizar la electricidad de la minicentral para bombear agua del canal para irrigar terrenos altos y abrirlos a la producción; o bien, construir cámaras frigoríficas para preservar los productos agropecuarios de la comunidad. Ninguna de ellas prosperó.

Así las cosas, en 1993 la minicentral quedó totalmente construida y lista para entrar en operación, pero en vez de ello entró en un largo período de congelamiento sin que hasta ahora, 22 años después, se tenga noticia en el Instituto de que se haya puesto a funcionar con algún propósito.



Mediante un estudio preliminar, realizado hace ya 30 años para la SENER, el IIE estimó en 300 MW el potencial energético aprovechable para generar electricidad mediante pequeñas instalaciones hidroeléctricas, utilizando el agua que corre a lo largo de los canales de 79 distritos de riego en el noroeste del país. Un programa para aprovechar este potencial podría abrir la oportunidad de instalar un poco más de 2,000 miniturbinas hidráulicas con capacidad entre 50 kW y 200 kW cada una. El proyecto de Tomatlán demostró que es técnicamente factible diseñar y construir en México minicentrales hidroeléctricas con tecnología nacional; pero a la vez demostró que hay otros factores, técnicos y no técnicos, que deben estar en su lugar a fin de que los proyectos de esta naturaleza puedan prosperar. El esquema de aprovechar las corrientes existentes en los canales de riego para generar energía eléctrica, si bien es una idea muy antigua, es una posibilidad que en la actualidad escasamente se comenta entre los interesados en la utilización de pequeñas centrales hidroeléctricas. Los estudios de la CONUEE también identificaron la existencia de unas 80 minicentrales en operación en el país, con una capacidad promedio de 1 MW por planta y con más de 60 años de servicio, lo que demuestra la nobleza de esta tecnología. También se estimó que existen unas 30 microplantas construidas, principalmente en fincas cafetaleras, en los Estados de Veracruz, Chiapas y Oaxaca.

Más de 20 años han pasado desde que se concluyó el proyecto de la minicentral en Tomatlán, período durante el cual prácticamente no ha habido actividad en este tema en el Instituto, y muy escasamente en el país. Sólo algunos trabajos ocasionales muy puntuales para dar apoyo técnico a jóvenes emprendedores, y a uno que otro inversionista ya no tan joven, interesados en desarrollar proyectos de mini y microcentrales hidroeléctricas, sin resultados que se pudiera pensar han cambiado el rumbo de la tecnología para bien en el país. Es mucha la inercia creada desde que se abandonaron en México estas tecnologías, por lo que retomarlas requerirá más que proyectos puntuales. En colaboración con algunos profesionales del ramo que aún existen en este país, y nuevamente con la asistencia de la Oficina México de ONUDI, la GER-IIE tomó nuevamente el reto de impulsar el aprovechamiento del micro y minipotencial hidroeléctrico del país. Con este propósito, en diciembre de 2014 el IIE puso por segunda ocasión a consideración del Comité Intersecretarial para la Cartera Nacional de Proyectos que serán sometidos para financiamiento por el GEF, la propuesta “Impulso al Aprovechamiento del Pequeño Potencial Hidroeléctrico de México”. GEF es la agencia de Naciones Unidas que otorgó financiamiento al Instituto para la construcción del CERTE, y para dar impulso a los pequeños sistemas fotovoltaicos conectados a red. En dicha propuesta se plantea el objetivo de impulsar el aprovechamiento del pequeño potencial hidroeléctrico de México en el rango de potencias menores de 5 MW, mediante el fortalecimiento de las capacidades humanas e institucionales del país, y la creación de nuevas capacidades complementarias en el marco de la Reforma Eléctrica, como un medio para evitar y reducir emisiones de CO₂ derivadas de la generación de electricidad en México. Nunca se tuvo respuesta del Comité en ningún sentido, lo que puede interpretarse como una muestra del desinterés de las autoridades mexicanas en el tema de las micro y minicentrales hidroeléctricas.

Sistemas híbridos

El sol y el viento son recursos energéticos renovables que adolecen de ser intermitentes, de tal forma que para su aprovechamiento con fines de suministro eléctrico en instalaciones aisladas, esto es, no conectadas a la red eléctrica, siempre requerirán algún tipo de respaldo, ya sea baterías o motogeneradores operados con combustibles, a fin de asegurar el suministro eléctrico durante el tiempo requerido. En algunos sitios se da el fenómeno natural de que el sol y el viento se alternan en el tiempo de manera complementaria, o bien coinciden durante largos períodos. En tales casos, para suministrar electricidad 24 horas al día, los siete días de la semana, conviene instalar en forma optimizada tanto paneles fotovoltaicos como generadores eólicos, y cualquier otra tecnología complementaria, en arreglos que se conocen como sistemas híbridos. Las tecnologías potencialmente integrables entre sí en sistemas híbridos para aplicaciones aisladas incluyen: paneles fotovoltaicos, generadores eólicos, micro y minicentrales hidroeléctricas, biodigestores y gasificadores u otras tecnologías de generación con biomasa, baterías eléctricas, celdas de combustible, motogeneradores convencionales, y microturbinas que pueden operar con biogás o gas de síntesis a partir de biomasa.

Lo que se busca con este tipo de sistemas híbridos es obtener lo mejor de las distintas tecnologías que en ellos se apliquen para producir una determinada cantidad de energía eléctrica a un menor costo. Su ventaja está



en que es posible, por ejemplo, alimentar micro o minirredes eléctricas para abastecer comunidades remotas, a diferencia del esquema en que cada vivienda se abastece con un pequeño panel fotovoltaico; su desventaja es que son sistemas más complejos de diseñar, construir y operar, que las plantas solares o eólicas autónomas.

El interés por los sistemas híbridos basados en energías renovables data al menos de la década de 1970, y se tienen referencias de proyectos experimentales, piloto, demostrativos y comerciales, prácticamente en los cinco continentes del mundo, tanto en países industrializados como en países en desarrollo. Sin embargo, el mercado no ha crecido como se esperaba, en parte por la complejidad técnica de los sistemas y lo difícil que resulta su manejo en sitios remotos de países en desarrollo (principal foco de interés comercial para el desarrollo de la tecnología por parte de los países industrializados), y en parte por los altos costos que aún tienen algunas de las tecnologías involucradas. Se espera que conforme los costos sigan bajando y la tecnología mejore con la incorporación de dispositivos automáticos y sistemas inteligentes, las instalaciones híbridas basadas en energías renovables se conviertan en una opción valiosa para electrificar comunidades u otras aplicaciones en zonas remotas, tanto en tierra firme como en las islas donde los recursos solar y eólico son abundantes.

En 1991, la Dirección General de LyFC requirió el apoyo de la GER-IIE para analizar la problemática que presentaba un sistema fotovoltaico/eólico/diésel construido por una empresa estadounidense en la población de María Magdalena, Hidalgo, como parte de un proyecto piloto de LyFC para electrificar comunidades apartadas de la red, pero con su núcleo de población bien definido. Los usuarios no estaban contentos con el servicio pues aunque en principio el sistema híbrido estaba diseñado para suministrar electricidad las 24 horas del día, la cantidad de electricidad disponible para cada usuario era limitada pues había negocios comerciales que demandaban mucha más electricidad que el resto de la población. El punto más cercano de la red eléctrica estaba a la vista, a unos cuantos kilómetros de distancia, por lo que la población exigía que la red se extendiera para cubrir sus necesidades. Finalmente así ocurrió.

En ese mismo año, en la población de Nueva Victoria, Coahuila, una empresa mexicana instaló un sistema híbrido fotovoltaico/diésel como

parte del programa de electrificación rural en esa zona. Aquí, la participación de la GER-IIE fue marginal, simplemente dando soporte técnico a la empresa que lo instaló. Poco se supo posteriormente de esa instalación, pero es muy probable que pocos años después la población haya sido alcanzada por la red eléctrica.



En paralelo con las acciones anteriores, en 1991 el IIE formalizó un acuerdo de colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), el cual condujo a la instalación, en los terrenos de la Preparatoria No.4 de esta Universidad, de un sistema híbrido experimental diseñado y construido por la GER-IIE. El sistema, ya desmantelado desde hace varios años al término de su función, tenía una capacidad nominal de 5.2 kW, el cual estaba integrado con 36 módulos fotovoltaicos con capacidad nominal de 2.7 kWp, 5 aerogeneradores de 500 Watts cada uno (Modelo Avispa, diseñados y construidos en la GER-IIE), un motogenerador a gasolina de 6.4 kilovolts-ampere como fuente de respaldo, un banco de baterías capaz de almacenar 1,500 amper-hora de electricidad a 12 Volts en corriente directa, y un banco de resistencias eléctricas mediante el cual era posible simular diferentes cargas.

Este pequeño híbrido se utilizó para realizar experimentos tendientes a determinar la eficiencia de diversas configuraciones del sistema, y también para simular el suministro eléctrico bajo diferentes patrones de demanda, correspondientes a diversos procesos productivos, o servicios comunitarios, tales como la producción de hielo, bombeo de agua, procesamiento de lácteos, elaboración de mermeladas y conservas de frutas, y producción de cárnicos tipo español, entre otros. Para este fin y con la ayuda de profesores y estudiantes de la Unidad Agropecuaria de la UAEH, por medio de mediciones sobre el consumo eléctrico de los equipos utilizados en las operaciones unitarias de los procesos mencionados, se determinaron los patrones de consumo eléctrico de estos procesos. Con base en la información obtenida se desarrolló un programa que permite simular los procesos en cuanto a su patrón de consumo eléctrico, y de esta forma determinar experimentalmente la configuración del sistema híbrido capaz de suministrar la suficiente electricidad para sostener la elaboración de un determinado producto bajo distintas condiciones climáticas y de volumen de producción.

Otras acciones del Instituto en el campo de los sistemas híbridos se dieron alrededor de 1992 cuando a solicitud del Departamento de Electrificación Rural de la Subdirección de Distribución de CFE, investigadores de la GER-IIE hicieron una evaluación del desempeño de cuatro sistemas de pequeña capacidad fotovoltaico/eólico/baterías, construidos como parte del programa PRONASOL del gobierno federal, para suministrar electricidad mediante microrredes eléctricas a cuatro comunidades remotas en el municipio de Mazapil, Zacatecas. No es aquí el lugar para hablar de los resultados de la evaluación, pero simplemente mencionar la importancia que tiene un buen estudio sobre la disponibilidad y características de los recursos energéticos locales para el correcto diseño y buen funcionamiento de los sistemas híbridos. Las cuatro poblaciones donde se instalaron los sistemas híbridos pronto fueron dotadas con suministro eléctrico por red.

Las primeras acciones en las que la GER-IIE se involucró directamente en el corazón y la dinámica de funcionamiento de los sistemas híbridos tuvieron lugar en 1992. El área de energías renovables de la empresa CONDUMEX, que previamente había construido el híbrido del poblado de Nueva Victoria, desarrolló un proyecto para instalar aerogeneradores y paneles fotovoltaicos con miras a disminuir el consumo de combustible de la máquina diésel que daba servicio por medio de una minirred eléctrica a la población de Xcalac, ubicada en el Estado de Quintana Roo, a pocos kilómetros de la frontera con Belice. Xcalac en ese entonces contaba con una población cercana a 250 habitantes, pero tenía una demanda de electricidad que correspondía a una población mayor, pues tratándose de un puerto pesquero muy cercano al arrecife de coral existente en aquella zona del Caribe Mexicano, era un destino turístico favorito de mucha gente, y por tanto contaba con los servicios que demanda una población flotante varias veces mayor. Así, además de la clínica médica, las escuelas, la capitanía de puerto y otros servicios gubernamentales, había restaurantes, bares y pequeños hoteles, cuya demanda eléctrica se conjugaba con la demanda domiciliaria de la población local.

En relación con el trabajo técnico realizado por la GER-IIE en este caso, el requerimiento fue la integración armónica de las tres fuentes de energía que alimentaban el sistema (sol, viento, diésel), y el balance de cargas en la red. Además de los generadores fotovoltaico y eólico, se incorporó en el sistema un banco de baterías y un controlador electrónico de manu-



factura australiana. Mediante un convenio de colaboración entre el IIE y el Centro de Asistencia para el Diseño Fotovoltaico de los Laboratorios Sandia de los Estados Unidos (PVDAC), se instrumentó todo el sistema híbrido con propósitos de monitoreo y evaluación de su operación. En ese entonces la recuperación de la información para el monitoreo del sistema se efectuó en forma remota vía telefónica por medio de un módem.

Fue mucho el conocimiento que se derivó de la información técnica obtenida de este sistema, lo que permitió un mejor entendimiento de la dinámica de los sistemas híbridos. Pero también por el lado de la gestión del sistema y el comportamiento de los usuarios se pudieron derivar muchas lecciones. Previo a la incorporación de las energías renovables, la electricidad era producida localmente mediante un motogenerador que consumía combustible diésel abastecido por el gobierno; el mantenimiento de la planta también era efectuado por personal oficial. En consecuencia la población no estaba acostumbrada a pagar por su consumo de electricidad; simplemente se habían adaptado a tener un servicio eléctrico restringido, solamente durante algunas horas de la tarde y noche. Mientras el motogenerador permanecía encendido, también permanecían encendidos el alumbrado público y todos los focos y aparatos eléctricos en hogares y negocios, con el consecuente desperdicio de electricidad. Así que, por oposición de la población, no fue posible implementar un esquema tarifario que permitiera racionalizar el consumo eléctrico y, al momento de integrar el sistema híbrido con fines de ampliar a 24 horas el período diario del servicio eléctrico, continuaron

las prácticas de uso ineficiente de la electricidad, se incrementó el consumo de diésel en lugar de disminuir, y el gobierno se negó a seguir suministrando gratuitamente el combustible que, dicho sea de paso, tenía que ser llevado por carretera a lo largo de varios cientos de kilómetros mayormente de terracería. La población respondió a la postura del gobierno con una exigencia para que la electricidad se llevara a la población por medio de la red. A fin de quitar de en medio el argumento de que la población ya contaba con electricidad generada localmente, llegó un momento en que el sistema híbrido de Xcalac, uno de los más grandes del mundo en su género en aquel tiempo, fue intencionalmente destruido por algunos lugareños.

LyFC continuaba con sus intentos para mostrar la viabilidad de los sistemas híbridos como fuente de suministro eléctrico en comunidades remotas (todavía estaba operando el sistema híbrido en María Magdalena, Hidalgo), por lo que en el año 1993, con apoyo económico de la Comunidad Judía en México y asistencia técnica de la GER-IIE, se instaló un sistema fotovoltaico/eólico/baterías en la comunidad rural de San Antonio Aguas Benditas, Estado de México. Los habitantes de esta comunidad ubicada en la falda noroeste del Nevado de Toluca se dedican al cultivo y comercialización de flores. Se tiene noticia de que la red eléctrica ya fue introducida a la comunidad y no se sabe cuál fue el destino de las instalaciones del sistema híbrido.

México cuenta con sitios de gran belleza natural y enorme atractivo para los amantes del ecoturismo y la conservación de la naturaleza. La existencia de paneles fotovoltaicos cada vez más baratos en el mercado ha facilitado la electrificación básica de pequeños hoteles ecoturísticos, principalmente en el sureste del país, y ha despertado el interés de algunos empresarios del ramo hotelero urbano por explotar la belleza de sitios remotos que no tienen acceso a la red eléctrica, utilizando para ello las nuevas tecnologías de generación eléctrica. Con esta motivación, la empresa hotelera Carrousel buscó el apoyo técnico de la GER-IIE para desarrollar un proyecto mediante el cual se pudiera demostrar la viabilidad de operar una instalación hotelera de primera clase utilizando fuentes locales de energía. En diciembre de 1995 el Instituto firmó un convenio con esta empresa para llevar a cabo un proyecto que consistió en la instalación de 17 sistemas microhíbridos fotovoltaico/eólico/baterías, con los que se suministraría el alumbrado exterior e interior en todas las instalaciones de un pequeño hotel ecoturístico ubicado en la localidad

de Playa Paraíso, 40 kilómetros al sur de Cancún, Quintana Roo. Cada uno de los sistemas híbridos quedaron integrados con aerogeneradores de 500 Watts desarrollados en la GER-IIE (el modelo Avispa), más una potencia similar con módulos fotovoltaicos, y baterías comerciales para almacenar energía. Los microhíbridos fueron instalados de forma independiente uno de otro y servían también a cargas independientes, excepto en el caso del restaurant y el salón de reuniones para cuyo servicio se interconectaron varios de los sistemas. Para el control y operación de los microhíbridos se desarrolló el *software* necesario y, para dar seguimiento al funcionamiento de estos sistemas, así como para obtener la información de las principales variables climatológicas y operativas, se instrumentaron dos microhíbridos con un sistema adquisidor de datos.

El pequeño hotel operó comercialmente durante varios años, período dentro del cual la GER-IIE utilizó sus instalaciones como hotel sede para llevar a cabo en 1995 un taller internacional sobre sistemas híbridos con energías renovables, como parte del cual se hizo una visita técnica al sistema híbrido de Xcalac. El proyecto, que dejó importantes lecciones en lo que se refiere a la incorporación de la autogestión eléctrica en una operación hotelera, concluyó con el cierre del pequeño hotel por así convenir a la empresa. La empresa ahora busca la oportunidad de escalar esta experiencia en un desarrollo hotelero de mayor envergadura, para cuyo proyecto la GER-IIE en colaboración con el Posgrado en Arquitectura de la UNAM realizaron los estudios preliminares, tanto energéticos como bioclimáticos.

Por su buena disponibilidad de sol y viento la península de Baja California ofrece condiciones muy atractivas para la instalación de sistemas híbridos. Al menos dos sistemas del tipo fotovoltaico/eólico/baterías siguen operando en esa región, con soporte de la CFE: uno en la localidad de Puerto Alcatraz, en la Isla Margarita, y el otro en la población de San Juanico, en el municipio de Comondú; ambos por el lado del Océano Pacífico. Pero hay muchos otros sitios donde este tipo de sistemas podrían ayudar a la población a mejorar sus condiciones de vida y abrirles oportunidades de emprender, o sostener, actividades productivas.

La GER-IIE realizó trabajos en el sistema de Isla Margarita a solicitud de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE. En ese proyecto, para el control del híbrido se utilizó un equipo fabricado por la empresa australiana que fabricó el control utilizado en el híbrido de Xcalac. Pero

en este caso el control tuvo diversas fallas, por lo que la Comisión solicitó al IIE que realizara un diagnóstico del problema y desarrollara cursos de acción para resolverlo. Los problemas fueron resueltos y el híbrido opera con regularidad, salvo por los ocasionales daños que le provocan el paso de huracanes sobre la isla.

El híbrido de San Juanico tiene otra historia de la que el Instituto fue protagonista en sus primeras etapas. Como parte de las actividades de la División de Comercialización que tuvo el IIE a finales de la década de 1990, se establecieron vínculos de colaboración con la empresa eléctrica estadounidense *Arizona Public Service* (APS), empresa pionera en el uso de energías renovables, principalmente energía solar. En aquel país existía entonces un programa de incentivos por parte del gobierno de los Estados Unidos para fomentar el uso de las fuentes renovables de energía y evitar la emisión de CO₂ a la atmósfera. Las empresas que aspiraran a obtener tales incentivos podían desarrollar sus proyectos en territorio estadounidense o en algún país de menor desarrollo. Durante reuniones celebradas en las oficinas de APS y del IIE se acordaron varios proyectos, entre los cuales se incluyó la construcción de un sistema híbrido sol/viento/baterías que sería ubicado en algún sitio de la península de Baja California. Por ese tiempo, como parte de un convenio celebrado con el gobierno del Estado de Baja California Sur, investigadores de la GER-IIE realizaban trabajos de evaluación de recursos y desarrollo de proyectos con energías renovables en la región conocida como Pacífico Norte, al noroeste del estado, y habían identificado varias localidades donde podrían desarrollarse proyectos de este tipo. Las especificaciones del sistema híbrido y la selección de sitios propicios para su construcción fueron realizadas conjuntamente por APS y el Instituto, con información y apoyo logístico de la CFE. La etapa de ejecución del proyecto se formalizó dentro de los convenios previamente establecidos entre APS y la Comisión, con lo cual el IIE ya no tuvo mayor participación en el proyecto. Tanto la supervisión de la obra como la puesta en marcha del sistema estuvieron a cargo de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE; el soporte de la operación del híbrido está desde entonces a cargo de la Gerencia de Distribución Baja California de la Comisión.



Con el paso del tiempo la GER-IIE no ha renunciado a su compromiso de contribuir al avance de la tecnología de sistemas híbridos, debido al

gran potencial que se le reconoce a esta tecnología para resolver problemas de las muchas comunidades remotas que en este país no tienen acceso a las redes eléctricas; además de que la disminución que se observa en los costos de los distintos componentes de estos sistemas, y el significativo avance en las tecnologías modernas de control, los harán cada vez más competitivos y prácticos. Por ello, con recursos del Fondo SENER-CONACYT Sustentabilidad Energética, en 2010 la GER-IIE inició un proyecto para la habilitación de una nueva plataforma de pruebas de sistemas híbridos. Esta nueva plataforma de pruebas, ubicada en los terrenos del CERTE, tiene esencialmente los mismos elementos que cualquier sistema híbrido con renovables, pero incorpora una variedad de opciones tecnológicas que permitirán la realización de pruebas tanto de equipos de conversión de las energías renovables y de almacenamiento de energía, como de estructuras para optimizar su funcionamiento.

La GER-IIE se mantiene en activa colaboración con los integrantes de la red de instituciones de varios países que participan en el proyecto iberoamericano MIGEDIR (Micro-redes con Generación Distribuida de Renovables), así como con investigadores de los países miembros de la Agencia Internacional de la Energía que realizan labores de investigación en este tema. La nueva plataforma permitirá continuar las investigaciones en relación con actividades productivas, que se iniciaron con el pequeño híbrido que se instaló en dominios de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y facilitará el emprendimiento de nuevas investigaciones vinculadas con el desarrollo de microrredes inteligentes alimentadas con sistemas híbridos, dentro de un concepto denominado “Sistemas híbridos de segunda generación”.



Hidrógeno y celdas de combustible

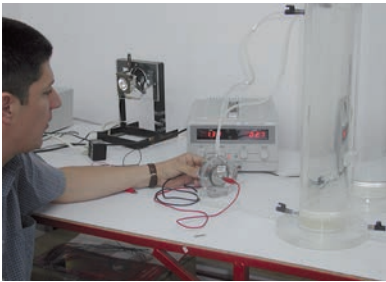
Ante la inminencia de la declinación de las reservas petroleras del mundo, y la inquietud de la población mundial acerca de los problemas ambientales globales causados por la quema de éste y otros combustibles fósiles, investigadores y organismos internacionales consideran que el hidrógeno será el combustible de elección en el futuro, en lo que se ha dado en llamar la Economía del Hidrógeno, ya que su combustión no resulta en emisiones contaminantes. Sin embargo, el hidrógeno es un gas que no existe libre en la naturaleza, y, por tanto, debe ser obtenido a partir de otros materiales que lo contienen. El petróleo y sus derivados son sustancias a partir de las cuales diversas industrias han obtenido tradicionalmente grandes cantidades de hidrógeno para sus operaciones. Sin embargo, la Economía del Hidrógeno no será sustentable si la fuente del gas hidrógeno continúa siendo de origen fósil, por lo que es necesario buscar y desarrollar otras fuentes y medios para obtenerlo.

La industria moderna ha utilizado hidrógeno como materia prima por más de cien años. Por ejemplo, la propia industria petrolera lo utiliza en los procesos de desulfuración de crudos pesados, lo que es particularmente relevante para el caso de México cuyo petróleo producido contiene cantidades importantes de azufre. Otras industrias, como la alimenticia, lo emplean en procesos de hidrogenación mediante los cuales transforman aceites en grasas sólidas de mayor punto de fusión, y la metalúrgica como medio reductor en el proceso para obtener metales a partir de los minerales disponibles en la naturaleza. Así, la producción y manejo del hidrógeno se ha convertido en una actividad muy común alrededor del mundo; lo que no es común (aunque tampoco es nuevo) es el uso de este gas como combustible, en buena medida por la percepción que hay en la población sobre los riesgos de seguridad que su manejo implica.



Dos atributos hacen que el gas hidrógeno sea una buena opción para sustituir al petróleo como combustible. Uno de ellos es su alto contenido energético que, gramo por gramo, es mayor que el de cualquier otro combustible conocido por el hombre, e incluso unas 3 veces mayor que el de la gasolina y el del gas propano; el otro es que su uso mediante celdas para producir electricidad es limpio, por lo que no hay emisiones

nocivas al medio ambiente. Su limitación es que, como ya se ha dicho, no se encuentra libre en la naturaleza por lo que debe extraerse de otras materias primas. De esta forma, su valor efectivo como energético sustituto depende de la materia prima empleada para su producción, de la ruta misma de producción, de la pureza del producto final y, sobre todo, de la manera en que es aprovechado.



Los retos asociados al uso del hidrógeno como combustible no son únicamente de naturaleza económica, en cuanto a los costos de producción del mismo, sino también de naturaleza técnica, asociados con la necesidad de almacenarlo en tanques a presión, debido a la baja compresibilidad de este gas. La necesidad de almacenar hidrógeno para tenerlo disponible sobre demanda, y las complicaciones de hacerlo en tanques presurizados, han motivado el desarrollo de nuevos métodos

de almacenamiento en forma sólida; por ejemplo, como compuestos denominados hidruros metálicos, o bien formando parte de la molécula de algún compuesto más fácil de almacenar y distribuir, método conocido como “hidrógeno químico”.

La ruta más atractiva para producir electricidad a partir del hidrógeno es por medio de las llamadas “Celdas de Combustible”. Éstas son dispositivos parecidos a las baterías que conocemos para almacenar energía, ya que en ambas ocurren procesos de transformación directa de la energía química de un reactivo (en este caso hidrógeno) en energía eléctrica. La diferencia estriba en que las baterías comunes son alimentadas con electricidad y entregan electricidad, mientras que las celdas de combustible son alimentadas con hidrógeno y oxígeno. Esto ocurre sin que se lleve a cabo el proceso convencional de combustión, lo que las hace altamente eficientes. Desde el punto de vista químico, lo que ocurre en una celda de combustible es un proceso de **electro-oxidación** directa del gas hidrógeno al entrar en contacto con el oxígeno del aire, lo cual produce energía útil en forma de electricidad y solamente genera agua (químicamente pura) como subproducto; no se producen otros gases en la reacción.

Una celda de combustible que emplea hidrógeno y opera a baja temperatura tendría una eficiencia teórica del 83% de conversión energética; esto es, de la energía contenida en el hidrógeno a la energía contenida en la

electricidad. En la práctica las celdas de baja temperatura presentan eficiencias superiores al 40%, siendo la diferencia respecto al valor teórico, el calor de reacción disipado en el proceso. Pero este calor puede utilizarse en procesos llamados de co-generación, en los que se produce de manera simultánea electricidad y calor para procesos productivos. Por lo tanto, es posible tener sistemas de generación con celdas de combustible con eficiencias globales superiores al 60% o 70%.

El desarrollo mundial de celdas de combustible se ha dado a lo largo de varias rutas tecnológicas, por lo que en la actualidad existen celdas del tipo “carbonatos fundidos”, “óxidos sólidos”, “ácido fosfórico”, y de “membranas de intercambio protónico” más conocidas como “celdas tipo PEM” (por sus siglas en inglés) que hasta ahora son las de mayor grado de aplicación comercial, y sobre las cuales se ha trabajado en el Instituto.



Antecedentes en el IIE

El área de Hidrógeno y Celdas de Combustible del Instituto se constituyó formalmente en el año 2002. Es la línea de investigación más nueva que se tiene en la GER-IIE. En esa fecha se inician los trabajos para el montaje de un laboratorio exclusivamente dedicado a estas tecnologías; pero hubo alguna actividad previa: Los primeros intentos por abordar el tema se hicieron en conjunto con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) a principios de la década de 1980, cuando se adquirió una celda de combustible del tipo “ácido fosfórico (PAFC)”, cuyo propósito era adquirir conocimiento sobre la tecnología. El proyecto no fue del todo exitoso, pero dejó importantes lecciones. A mediados de esa misma década se llevaron a cabo algunos trabajos de tesis sobre este tipo de tecnología en el entonces Departamento de Combustibles Fósiles y, más de 10 años después, nuevamente en colaboración con el IMP, se realizaron gestiones para traer a México un sistema de celda de combustible PAFC de 200 kW de capacidad, que se planeaba alimentarla con gas natural. Como parte del proyecto se tenía contemplado un estudio de impacto social y ambiental en una pequeña comunidad seleccionada para recibir el beneficio de la electricidad producida a fin de aprovecharla para llevar a cabo actividades productivas. A su vez, el IIE estaría adquiriendo experiencia en la instalación, servicio y operación de un sistema con esta tecnología innovadora. Situaciones geopolíticas del momento evitaron que estos esfuerzos se materializaran, pero se ganó experiencia sobre un proyecto de esta naturaleza, incluyendo los requisitos técnicos y de planeación para la instalación y operación de una celda de este tipo.

En el período 1998-1999, la Gerencia de Materiales y Procesos Químicos del Instituto realizó proyectos de investigación y desarrollo con el objetivo de entender la actividad catalítica del platino en celdas de combustible ácidas operando con hidrógeno, así como la importancia de la estructura porosa de los electrodos de gas empleados en ese tipo de celdas. En el año 2000, se llevaron a cabo actividades para promover la aplicación de celdas de combustible en varios ámbitos, entre las cuales se logró desarrollar un proyecto para PEMEX, cuyo objetivo fue elaborar las especificaciones técnicas necesarias para la instalación de un sistema autónomo de generación eléctrica en la plataforma Ek-Balam de la sonda de Campeche utilizando tecnología de importación. Dicha plataforma corresponde a un pozo de dimensiones menores, cuyo producto extraído mostraba concentraciones prácticamente nulas de monóxido de carbono y de azufre, sustancias nocivas para las celdas de combustible, así como una cantidad importante de gas natural asociado, a partir de lo cual se estableció el concepto final del sistema. El proyecto llegó hasta la preparación de las bases de concurso, pero no llegó a licitarse.

En busca de tecnología propia

Como parte de una reestructuración llevada a cabo en áreas técnicas del Instituto en el año 2002, las actividades sobre celdas de combustible fueron trasladadas a la GER-IIE, donde se formalizó la línea de trabajo en este tema, y se iniciaron las actividades para montar un laboratorio especializado, cuya infraestructura se fue consolidando poco a poco a lo largo de los siguientes años. En un principio las tareas de investigación se llevaron a cabo en instalaciones improvisadas en la azotea del edificio 24 (donde se ubica la Gerencia de Geotermia), las cuales previamente sirvieron para realizar experimentos sobre los efectos de la lluvia en estanque solares, así como otros de muy corta duración sobre generación magnetohidrodinámica de baja temperatura. Al tiempo que se integraba la infraestructura del nuevo laboratorio se implementaron medidas para fortalecer el equipo humano con la incorporación de nuevos investigadores formados en esta área, tanto en el país como en el extranjero, que habrían de dedicarse específicamente al desarrollo de tecnología de las llamadas celdas de membrana de intercambio protónico, o tipo PEM.

Apoyados en la infraestructura creada y la dotación de modestos presupuestos se inició el desarrollo propio de los elementos básicos que constituyen los llamados ensambles membrana-electrodo (MEA, por sus siglas en inglés). Estos elementos constituyen el corazón de la tecnología de celdas PEM, ya que es en ellos donde se lleva a cabo la transformación de la energía del hidrógeno a electricidad. La ruta hacia la fabricación de MEA de tecnología propia requirió grandes esfuerzos de investigación básica para la formulación correcta de las tintas catalíticas y el necesario tratamiento de las membranas poliméricas donde se aplican las tintas para formar así los electrodos que inducen la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno para producir electricidad.

También hubo necesidad de desarrollar técnicas y métodos para depositar la tinta sobre las membranas, actividad que evolucionó desde un método manual basado en el uso de brochas comunes para pintura, hasta el actual método automático por aspersion que acelera el proceso y permite producir electrodos de mayor superficie, al tiempo que garantiza la uniformidad del depósito y la homogeneidad de las membranas así activadas. Ya para el año 2003, los resultados de los ensayos mostraban que la tecnología desarrollada en el IIE tenía un

desempeño comparable al de productos comerciales de empresas internacionalmente reconocidas en el campo de las celdas de combustible, como Dupont y Electrochem.

A mediados del año 2005, los investigadores del Instituto ya habían integrado series de ensambles membrana-electrodo para construir los llamados *stacks*, lo que permitió construir dispositivos de mayor potencia. Para alcanzar este nivel fue necesario primero trabajar en el diseño y fabricación de las llamadas **placas bipolares**. Éstas son elementos construidos generalmente en materiales como el grafito, y que realizan un conjunto de funciones simultáneas: sirven como soporte mecánico de las MEA, conducen separadamente el hidrógeno y el oxígeno hacia el electrodo donde han de reaccionar, desalojan el agua producida en la reacción, conducen la electricidad de celda en celda hacia el *bus* que conecta con el circuito exterior, y remueven el calor que se produce en el área activa.



El desarrollo de estos dispositivos no fue una tarea fácil debido a la diversidad de disciplinas científicas que conlleva su diseño. Tampoco fue fácil resolver otro problema aparentemente trivial: la fabricación de sellos poliméricos que dan hermeticidad al *stack* y evitan la fuga de reactivos en su camino hacia los electrodos. Una vez logrado que estos dispositivos de tecnología propia operaran en forma regular, se habilitaron aplicaciones con propósitos demostrativos, como la operación de un aparato radio-receptor y una computadora. Estas fueron las primeras experiencias de generación de electricidad en México con tecnología propia de celdas de combustible y energía 100% limpia.

Los trabajos de investigación continúan en varios frentes con el propósito de mejorar las técnicas y el desempeño de los distintos componentes que constituyen los MEA y los *stacks*, y ya se cuenta con tecnología IIE para fabricarlos de hasta 170 cm², lo que permite desarrollar generadores eléctricos con celda de combustible para propósitos específicos. Se continúan los trabajos para el desarrollo de mejores tintas catalíticas, diseños de placas bi-polares con materiales avanzados, y desarrollo de mejores sellos poliméricos para el ensamble de *stack*.

Tecnología para prueba de celdas

Comparar el desempeño del producto propio con el de productos ya establecidos en el mercado es una forma de medir el camino por recorrer para ser competitivos. Pero es difícil conocer de manera precisa el desempeño de productos comerciales, a menos que se cuente con medios y técnicas para medirlo. Fue por ello que en el período 2004-2005 se abordó la tarea de probar y caracterizar celdas de combustible disponibles comercialmente en otras partes del mundo. El propósito fundamental de estos ensayos fue conocer de primera mano el desempeño de tales productos, y, al mismo tiempo, detectar retos técnicos durante la operación real de las celdas. Dado que, en general, dichos productos eran comercializados para aplicaciones residenciales, en el Instituto se desarrolló un equipo digital para las pruebas en cuestión, que permite simular la carga eléctrica individual, o varias cargas sumadas, de los consumos eléctricos de aparatos electrodomésticos, tales como refrigeradores, lavadoras y dispositivos de iluminación y entretenimiento. Este equipo, del cual se obtuvo ya una patente, ha resultado de mucha utilidad para el proceso de desarrollo de las celdas propias en el IIE.

La prueba de equipos comerciales permitió conocer y estudiar procesos importantes, como la producción de agua al momento de la reacción en el interior de la celda, fenómeno que normalmente obliga al diseñador a establecer estrategias para desalojar de alguna forma el agua excedente. Los ensayos con celdas de combustible comerciales aportaron al grupo conocimiento adicional sobre otros temas importantes, como el impacto en la variación de la presión de entrada del combustible sobre el tiempo de arranque, lo que ha sido de mucha utilidad para el diseño de los sistemas propios.

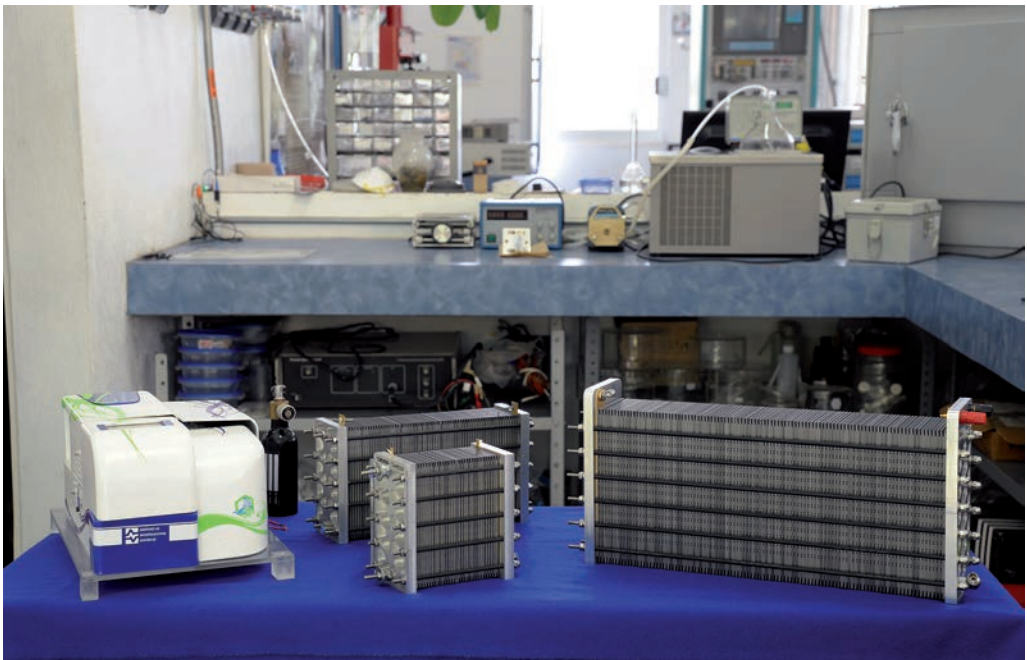
El proceso inverso

En la actualidad, el método más común para la producción de hidrógeno es a partir de la reformación de gas natural, pero están en desarrollo métodos para producirlo de manera sustentable con fuentes renovables de energía. Por ejemplo, rompiendo la molécula del agua en sus dos componentes, oxígeno e hidrógeno, mediante aparatos conocidos como *electrolizadores*, que realizan esa función mediante el paso de una corriente eléctrica, la cual puede ser producida con energía solar, eólica u otras de origen renovable.

La propiedad que tienen los ensambles membrana-electrodo para combinar el hidrógeno con el oxígeno y producir electricidad, teniendo como subproducto agua químicamente pura, puede también, con los ajustes correspondientes, ser aprovechada para realizar el proceso inverso; esto es, descomponer el agua mediante el paso de una corriente eléctrica para liberar en forma de gases el hidrógeno y el oxígeno contenidos en sus moléculas. Es así como el desarrollo de MEA en el Instituto constituyó también la base tecnológica para la posterior fabricación de ensambles para *electrolizadores*. En el año 2003, se logró generar en el laboratorio combustible hidrógeno 100% renovable, por medios electrolíticos a muy bajos voltajes (<2V) mediante un aparato integrado por una celda fotovoltaica cuya electricidad producida con la energía del sol era alimentada a un pequeño electrolizador desarrollado en el IIE. El hidrógeno así producido era alimentado a una celda de combustible, la cual a su vez suministraba electricidad a un pequeño motor de corriente directa.

El conocimiento adquirido a través de estas experiencias en laboratorio sirvió a la GER-IIE para diseñar un sistema solar-hidrógeno a escala real, capaz de producir 1,000 litros por hora de hidrógeno a partir de electricidad generada con paneles fotovoltaicos, primero en su tipo en Latinoamérica y, probablemente, uno de los primeros fuera de Japón y Europa. Para la integración de este sistema se utilizaron tecnologías comerciales, con base en criterios propios para el diseño del sistema. A diferencia de los sistemas europeos y japoneses que a esa fecha se habían integrado, en el sistema del Instituto se mantuvo la filosofía de minimizar el número de componentes, particularmente aquellos asociados al acondicionamiento de potencia, para reducir el costo de inversión y aumentar la eficiencia global del sistema. Lo anterior se consiguió con un generador fotovoltaico de 2.5 kW de potencia, con salida a 48 Volts de

corriente directa, para empararlo con la curva de carga del electrolizador, y así poder operar ambos equipos lo más cerca posible a sus respectivos puntos de máxima potencia, independientemente del nivel de insolación y de la temperatura del arreglo fotovoltaico. Este concepto, aún embrionario, ha dado buenos resultados y está listo para el escalamiento en instalaciones de mayor capacidad para avanzar en la ruta de mejorar las eficiencias y disminuir los costos.



Tecnologías de soporte

En campos nuevos del desarrollo tecnológico, como es el caso de las celdas de combustible, con frecuencia se hacen evidentes requerimientos adicionales de elementos de soporte que faciliten y apoyen los nuevos desarrollos. Estos elementos, que pueden ser equipos o herramientas computacionales entre otros, no siempre están disponibles en el entorno local, o simplemente no existen. Por ejemplo, equipos para pruebas de sistemas completos de generación de celdas de combustible. Estos sistemas están integrados con componentes adicionales a los MEA y a los *stacks*, anteriormente, descritos y constituyen lo que se conoce como *Balance de Planta*, o BOP por sus siglas en inglés. Entre ellos se incluyen componentes más o menos convencionales como reductores de presión, reguladores y válvulas de flujo, tuberías y conectores, así como sensores y dispositivos para el suministro de energía adicional al sistema. Todo lo anterior orquestado por un sistema de control que se encarga de mantener las condiciones de operación necesarias para satisfacer la demanda de potencia de la aplicación deseada. Así, el BOP de una celda de combustible debe ser diseñado en función a los requerimientos de la aplicación específica para la cual está destinada la celda.

Dada la multiplicidad de aplicaciones a que pueden estar destinadas las celdas de combustible, en la GER-IIIE se vio la necesidad de desarrollar una plataforma para realizar pruebas a los sistemas completos; pruebas que son diferentes a las que convencionalmente se hacen a las celdas de combustible propiamente dichas, y que incluyen variantes extremas en la operación, así como el monitoreo de un mayor número de variables y mayor número de etapas de control.

Con el mismo propósito se desarrollaron técnicas de evaluación y de diagnóstico, tales como modelos matemáticos para el estado estacionario, así como para la respuesta dinámica de las celdas. También se desarrollaron técnicas que permiten diagnosticar efectos internos de las celdas en operación, como el estado de inundación causado por el agua que se produce durante la reacción, o bien el grado de conducción iónica en los electrodos de las mismas. Las herramientas de este tipo resultaron de gran importancia, pues han permitido mejorar los diseños de los componentes de las celdas, así como la operación del generador eléctrico y del BOP y, por lo tanto, mejorar la eficiencia y el costo final del sistema de generación.

El primer prototipo

Ocho años después de que se tomó la decisión de crear formalmente el área de investigación sobre el tema, el IIE ya contaba con un grupo de investigación consolidado y de clase mundial, infraestructura de soporte en un laboratorio con los elementos básicos para la investigación, tecnología propia de celdas de combustible, varias patentes en proceso, y un prototipo pre-industrial de celda de combustible de 1 kW de potencia nominal. Este prototipo genera electricidad en corriente directa a 45 V y 30 A, y sienta las bases para diferentes aplicaciones, tanto móviles como estacionarias. La escala del prototipo se estableció considerando las oportunidades que ofrece el sector domiciliario de alto consumo eléctrico en ciudades que cuentan con red de tubería para distribuir gas natural a las casas, así como la posibilidad de integrar las celdas de combustible con generadores fotovoltaicos para el autoabastecimiento eléctrico en ese sector. De momento los esfuerzos se encaminan hacia la integración del paquete tecnológico correspondiente para ser transferido a empresas interesadas en su fabricación industrial con fines de aplicación comercial.



Baterías electroquímicas

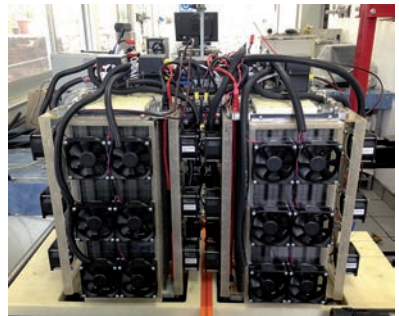


Ya se ha dicho que las celdas de combustible tienen una gran similitud con las baterías electroquímicas, salvo que éstas son solo almacenes de electricidad, mientras que aquellas producen electricidad. Pero hay muchos principios científicos y tecnológicos comunes a ambas, lo que permite a los especialistas aplicar sus conocimientos y capacidades indistintamente en ambos campos y con diversidad de propósitos. Es así que en el ámbito de las baterías electroquímicas el personal de la GER-IIE ha hecho contribuciones importantes en áreas como la determinación del estado de carga y la vida residual de baterías del tipo plomo-ácido, níquel-hidruro metálico y níquel-cadmio, métodos para pruebas estándar, y análisis *post mortem* para determinar la causa raíz de fallas prematuras. También se han desarrollado métodos en los que se utilizan mediciones de impedancia eléctrica como pruebas de control de calidad durante la manufactura de baterías. De manera importante, y como elementos para la aplicación integrada de baterías con celdas de combustible en vehículos de transporte, la GER-IIE ha desarrollado diversas aplicaciones para baterías de ion-litio, útiles para el diseño y prueba de los bancos de almacenamiento eléctrico y la integración de los sistemas.

Tecnología IIE para el transporte

Los costos de producción del hidrógeno siempre serán relativos a los costos de los combustibles que sustituye. Por ejemplo, en el caso de la gasolina, los costos de extracción del petróleo, su transportación y su refinación se ven reflejados en el precio que pagamos por litro de este carburante. A este costo debe agregarse también el costo asociado a la manera en que empleamos la gasolina; esto es, al quemarla en los actuales motores de combustión interna, menos del 18% de la energía contenida en la gasolina es aprovechada para motricidad del vehículo, por lo que, al final, lo que importa es el costo por kilómetro recorrido con un determinado combustible. Por otro lado, los vehículos automotores se han convertido en la mayor fuente de emisiones nocivas de tipo móvil en el mundo. Por ello, el transporte eléctrico ofrece una alternativa, tanto para la movilidad personal como para el transporte público, que a la vez atiende el problema de las bajas eficiencias del uso de carburantes, produce poco ruido, deja poca huella térmica y tiene otras ventajas, como menores requerimientos de mantenimiento comparado con los vehículos convencionales.

La GER-IIE desarrolla proyectos asociados a propuestas tecnológicas aplicables a transporte utilitario y público, con tecnologías avanzadas tanto de almacenamiento de energía como de generación de energía a bordo. Para ello trabaja actualmente en la construcción de una planta de celda de combustible de 3 kW de potencia nominal basada en tecnología cien por ciento desarrollada en la GER-IIE. Esta planta habrá de instalarse en un vehículo eléctrico híbrido del tipo utilitario que está siendo desarrollado en colaboración con otras instituciones y con financiamiento del Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACYT. El proyecto tiene como objetivo demostrar la viabilidad técnica de integrar de manera sinérgica la celda de combustible para producir electricidad, con baterías del tipo ion-litio para almacenarla, y supercapacitores para la recuperación de energía durante el frenado del vehículo, técnica conocida como *freno regenerativo*.



Este es un proyecto pionero en el país, en el que participan, además del IIE, el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA) del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) campus Toluca, el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

(CENIDET) ubicado en Cuernavaca, Morelos, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), y el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Al tiempo de escribir estas líneas el grupo de trabajo se encontraba ya ensamblando los distintos componentes del vehículo y se esperaba que en unos meses más se habrían de llevar a cabo los primeros recorridos de prueba, así como demostraciones a potenciales inversionistas que quisieran llevar la tecnología al mercado, dado que el requerimiento de los vehículos utilitarios de bajas o nulas emisiones nocivas es muy grande tanto en México como en el mundo.

Las celdas de combustible tienen también aplicación en el transporte público de pasajeros con trenes ligeros, lo que ha movido a empresas como *Alstom*, *Siemens*, *Bombardier*, y la canadiense de celdas de combustible *Ballard Power Systems*, a incursionar tempranamente en este campo. Y al menos una empresa mexicana ha decidido explorar las oportunidades que este campo ofrece en México. Dicha empresa solicitó a la GER-IIE llevar a cabo el estudio de alternativas tecnológicas avanzadas para almacenar energía o generar electricidad a bordo de un sistema de transporte tipo tren ligero, evaluando características de desempeño, costos e implicaciones de su puesta en operación. Este estudio motivó el desarrollo en la GER-IIE de una herramienta computacional que estima los requerimientos energéticos del tren a partir de información de entrada, asociada a la topografía y planeación de la ruta (número y ubicación de estaciones, etc.) y a parámetros de diseño del vehículo, así como a datos sobre las jornadas de operación. La herramienta también especifica y compara,



desde el punto de vista del costo, peso y volumen, diferentes tipos de baterías dados los requerimientos de capacidad del vehículo en amperes-hora. Esta herramienta evalúa también las dimensiones de los supercapacitores, de las baterías y de las celdas de combustible, en función de una configuración dada. Adicionalmente, para casos que consideran celdas de combustible, la herramienta estima el tamaño del sistema de hidrógeno (tanques y contenido másico) para esas aplicaciones en particular. La herramienta de cálculo permite incorporar fácilmente otras opciones, como asistencia energética en estaciones para recargas rápidas o líneas de arranque en la salida, dándole flexibilidad para evaluar opciones que conduzcan a un diseño final a satisfacción del desarrollador, quien actualmente sopesa la posibilidad de integrar un sistema piloto real.

La autonomía de los vehículos eléctricos (distancia en kilómetros que puede recorrer partiendo con las baterías a plena carga) es uno de los parámetros que representan retos importantes para la masificación de esta tecnología, dado que la autonomía de vehículos automotores, a gasolina o diésel, es actualmente muy alta. Es por esta razón que en la etapa de transición actual las empresas automotrices introducen al mercado vehículos híbridos en los que un pequeño motor de combustión extiende el rango de kilómetros que el vehículo puede recorrer.

Esta función de “extender” la autonomía de un vehículo puede también realizarse mediante el uso de celdas de combustible, por lo que la GER-IIE ha iniciado un proyecto para la evaluación de un *extensor de autonomía* con celdas de combustible para un sistema de transporte eléctrico autónomo de la empresa ModuTram. Este es un sistema de transporte llamado de tránsito rápido grupal (GRT o *Group Rapid Transit*), complementario a otros sistemas, en el que una flotilla de vehículos automatizados (sin conductores humanos), ligeros y eficientes, tienen capacidad para transportar pequeños grupos de pasajeros, y que pueden ser acoplados para formar minitreneos e incrementar así su capacidad. Al igual que otros sistemas ligeros, éste corre por una vía exclusiva que le permite independencia de tránsito, como ocurre entre terminales aéreas en muchos aeropuertos. Aquí las celdas de combustible servirán para incrementar la autonomía del sistema energético mediante recargas de las baterías a bordo, o bien alimentando directamente el sistema de tracción cuando las baterías no tengan ya capacidad para suministrar la carga, y de esta forma incrementar las horas de operación entre recargas con electricidad de la red a las baterías cuando el vehículo se encuentra en las terminales.

Los vínculos creados

La colaboración con otras instituciones ha sido de gran importancia para la consolidación de las capacidades del grupo de trabajo en celdas de combustible de la GER-IIE, como se demuestra en el caso del vehículo utilitario relatado anteriormente. Tal como ocurrió años atrás en el caso de la formación de la Asociación Nacional de Energía Solar y otras asociaciones profesionales en el país, investigadores del Instituto jugaron un papel muy activo en la integración de un grupo de instituciones que en 1999 fundaron la Sociedad Mexicana del Hidrógeno, foro que ha facilitado trabajos conjuntos con varias instituciones, y del que un investigador de la GER-IIE desempeñó el cargo de Presidente Nacional en el período 2004-2006.

La colaboración internacional ha sido también uno de los pilares de gran beneficio para el desarrollo de las actividades en el Instituto. Tal ha sido el caso de la relación con el *Fuelcells Propulsion Institute* (FPI), consorcio internacional donde participan laboratorios nacionales de los Estados Unidos, y empresas de ese país y de Canadá. Como parte de este organismo, la GER-IIE participó en las etapas iniciales de un proyecto para el desarrollo de una retroexcavadora propulsada por una celda de combustible a hidrógeno; y durante el período del 2000 al 2002 un investigador del Instituto ocupó la segunda vicepresidencia de dicho organismo. El grupo del IIE también participa activamente en los trabajos del “Acuerdo de Celdas de Combustible Avanzadas” de la Agencia Internacional de la Energía, y en eventos del *International Partnership for Advancing the Transition to Hydrogen* (PATH), iniciativa de los Estados Unidos, en donde las mayores potencias económicas del mundo armonizan sus programas nacionales de hidrógeno y con el cual el Instituto, en conjunto con la Sociedad Mexicana del Hidrógeno, realizó el primer foro nacional de hidrógeno en México, en 2003, así como un taller de hidrógeno dirigido a economías de la región Asia-Pacífico (APEC).

Entre otros eventos pioneros que el IIE ha organizado en conjunto con otras instituciones nacionales, está la serie internacional del simposio HYPOTHESIS (*Hydrogen Power Theoretical and Engineering Solutions*), realizado en el año 2007. La relación del Instituto con organismos internacionales le ha permitido además proponer y liderar temas novedosos de investigación y desarrollo, que han sido bien acogidos por la comunidad internacional, tales como el desarrollo de nuevas técnicas de diagnóstico para celdas de combustible; y apoyar la formación de grupos

en la región iberoamericana sobre temas asociados al hidrógeno y a la tecnología de celdas de combustible.

Cada nueva tecnología significa una nueva industria y, con ésta, la creación de oportunidades para proveedores, vendedores, prestadores de servicios especializados, desarrolladores de proyectos, servicios post-venta, etc. Por supuesto, la introducción de nuevos equipos en la industria requiere normalización y otros elementos institucionales para el ordenamiento del mercado. Del mismo modo que el almacenamiento de hidrógeno viene generando nuevas industrias y nuevas oportunidades de inversión, las celdas de combustible como generadores eléctricos también representan nuevas oportunidades. Las aplicaciones que de éstas vienen surgiendo son a su vez nuevas industrias, casi inexistentes el día de hoy, las cuales requieren proveedores de componentes, de materiales y de nueva infraestructura dedicada a tecnologías que rara vez la gente llega a conocer. Por ejemplo: un auto con celdas de combustible utiliza sistemas motrices eléctricos. El generador eléctrico no tiene partes móviles y no se requiere lubricación, pero sí electrónica de potencia; por lo tanto, se abre la necesidad de que los talleres mecánicos tradicionales para autos evolucionen para convertirse en talleres preponderantemente eléctricos, con nuevos equipos y herramientas, y nuevos sistemas de diagnóstico. Los conocimientos que se han generado en el IIE, y la experiencia que se viene adquiriendo a lo largo del desarrollo de cada vez más y nuevos proyectos, constituyen una importante plataforma para la transición hacia nuevas formas de hacer las cosas con nuevos combustibles y nuevas tecnologías.

*De lejos, el mejor premio que la vida ofrece
es la oportunidad de trabajar
en algo que merezca la pena*

Theodore Roosevelt



El recurso humano



Formar recursos humanos altamente calificados en los temas de interés para el sector eléctrico ha sido una de las principales tareas del Instituto desde su creación, especialmente en aquellas áreas, como la de energías renovables, en las que hace cuatro décadas había muy pocos especialistas tanto en México como en el resto del mundo. Es así que muchos de los investigadores que a lo largo de los años son o han sido parte de la plantilla del IIE se formaron en el propio Instituto. Cientos de jóvenes procedentes de diversas instituciones de todas partes de la república, e incluso algunos del extranjero, han realizado estancias de servicio social y prácticas profesionales, o han desarrollado aquí sus tesis de licenciatura, maestría o doctorado. Solamente en la GER-IIE, en los últimos 15 años, se han tenido poco más de 150 becarios en todos los niveles. El actual programa de Adiestramiento en Investigación Tecnológica (AIT) ha sido desde su creación en 1992, un importante semillero de jóvenes talentos, algunos de los cuales se incorporan laboralmente al Instituto al término de su programa, y otros más ya con mayores calificaciones y experiencia pasan a trabajar en empresas, o bien optan por seguir estudios de posgrado.



El equipo de trabajo del IIE en energías renovables se inició con un reducido grupo de investigadores, y un número mayor de becarios. Los “Proyectos de Infraestructura” de entonces constituían el mecanismo que permitía a becarios bajo la guía de los investigadores explorar y trabajar en temas que no forzosamente tenían un cliente que pagara el costo de esos trabajos

(el Instituto era el propio cliente), y que no necesariamente tenían que terminar en un “producto vendible en el mercado”. El “producto” era el conocimiento que se generaba, junto con el crecimiento y fortalecimiento de quien lo generaba, capital que se vino acumulando a lo largo de los años al interior del IIE. Mucho de ese conocimiento está contenido en docenas de informes técnicos que se generaron a lo largo de los primeros años de existencia de la GER-IIE, pero que en buena medida se adelantó a su época, dado que las energías renovables no tenían horizonte en ese entonces en el país. Otra buena porción de ese conocimiento ha salido del Instituto ya en forma explícita como contenido de manuales, guías de usuario, artículos técnicos y científicos, libros, material didáctico, etc. Y otro más se ha ido en forma implícita en la mente de los estudiantes y de los investigadores que por una u otra razón han tenido que abandonar las filas de la GER-IIE, pero que con seguridad está siendo aplicado en otros lados en beneficio del país.



La vinculación con otros grupos e instituciones, nacionales y del extranjero, ha ayudado a acrecentar y fortalecer el capital humano del IIE en temas específicos de las energías renovables, mecanismo vigente y de gran valor aún hoy en día. Programas de colaboración como el que el Instituto estableció hace tiempo con la Universidad de *Salford*, o los que actualmente se tienen con el CENIDET y otras instituciones académicas del país y del extranjero, han permitido que varios investigadores de la GER-IIE puedan adquirir mayores conocimientos científicos que los han llevado a obtener posgrados en temas avanzados.



El acopio de nuevos conocimientos y el fortalecimiento de las capacidades entre los investigadores de la GER-IIE no han sido solo para beneficio hacia el interior del IIE. A lo largo de su historia los investigadores de la GER-IIE han dictado conferencias, han impartido cursos y diplomados, han organizado (y continúan organizando) seminarios, talleres, coloquios, conferencias (nacionales e internacionales), y varios otros eventos por medio de los cuales se ha compartido el cono-



cimiento adquirido con jóvenes estudiantes, profesores e investigadores de otras instituciones, personal de empresas y organismos públicos; y se han tendido los puentes para que ellos puedan acceder al conocimiento existente en los organismos con los que el Instituto tiene vínculos establecidos.



Esta labor ha fructificado en algunos casos donde las propias instituciones han establecido ya cursos formales en las carreras técnicas y de licenciatura, e incluso con la creación de posgrados en energía renovable, como ocurre con la Maestría en energía eólica creada por la Universidad del Istmo, ubicada en el Estado de Oaxaca, la cual recibe apoyo de catedráticos miembros de las instituciones pertenecientes al CEMIE-E que lidera la GER-IIE.

La GER-IIE, al igual que otras áreas del IIE, ha mantenido abiertas las puertas de sus laboratorios y estaciones de pruebas para que estudiantes y profesores de otras instituciones, con la tutoría de investigadores del Instituto, realicen sus ensayos y experimentos conducentes a la obtención de posgrados o a la publicación de artículos, según sus necesidades, lo que regularmente conduce a estrechar los lazos de la colaboración y a la búsqueda conjunta de recursos para más y nuevas investigaciones.



No todo se da en el ámbito científico o en el nivel de la enseñanza superior. Los investigadores de la GER-IIE también en forma recurrente capacitan a técnicos medios en las artes de instalar, operar y mantener equipos y sistemas para generar electricidad a partir de las energías renovables. Un caso notable es el reciente curso “Cambiando la cultura: Mujeres electricistas especializadas en sistemas fotovoltaicos conectados a la red, con conocimientos en pequeñas y medianas empresas”, destinado a crear cuadros certificados de mujeres como electricistas especializadas en instalación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Este curso, desarrollado en respuesta a requerimientos de la SENER, busca además promover el uso de energía renovable en el país, impulsar a las mujeres a adoptar oficios que tradicionalmente se consideran fuera de su ámbito, así como fomentar el autoempleo y el desarrollo económico de las mujeres en materia de electricidad; y con ello impulsar el cambio de cultura a favor del desarrollo de las mujeres. El material didáctico relativo a los sistemas fotovoltaicos utilizado en el curso fue elaborado e impartido por investigadores de la GER-IIE. Grupos de mujeres que han tomado este curso ya obtuvieron una certificación, o están por obtenerla, de parte del Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales (CONOCER) de la SEP.



Mucho queda todavía por hacer para que las energías renovables puedan jugar el papel que les corresponde en el desarrollo del país. La formación de recursos humanos especializados continúa siendo uno de los temas más críticos y preocupantes dada la demanda de especialistas que se vislumbra con el crecimiento del mercado de las energías renovables en México y por los largos tiempos que lleva formar estos especialistas en el sistema de educación formal. La magnitud del reto se hace explícita con el lanzamiento por parte del Gobierno Federal del “Programa Estratégico de Formación de Recursos Humanos en Materia Energética”, que implica formar y certificar a 135,000 expertos de alto nivel en distintas especialidades. En cuanto a las energías renovables, los especialistas de la GER-IIE tienen conocimientos y experiencia que pueden ser aprovechados para formar cuadros de formadores en las distintas áreas tecnológicas (sol, viento, biomasa, etc.). Las carreras de ingeniería en energía renovable de reciente creación en las universidades politécni-





cas y tecnológicas del país constituyen un campo fértil donde las capacidades de la GER-IIE habrán de encontrar el medio propicio para multiplicarse.

Por el nivel profesional de sus investigadores, por el tiempo durante el cual la GER-IIE ha mantenido invariantes sus líneas de trabajo, por sus logros a lo largo de 40 años, por su vinculación con la industria, por su participación en redes de especialistas internacionales, por la cobertura geográfica de sus servicios en el plano nacional y en el internacional, en fin por su trayectoria, el grupo de investigación en energías renovables del IIE se cuenta entre los más y mejor consolidados en el país y en el mundo en este campo del conocimiento. Sus aportaciones han ido más allá de los aspectos puramente técnicos, ya que a través de los años sus investigadores han concebido iniciativas para impulsar diversas líneas de investigación y desarrollo tecnológico, y otras en aspectos no-técnicos que han facilitado el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en el país. Tal ha sido el caso de los coloquios que por más de diez años se realizaron anualmente para promover el desarrollo del corredor eólico del Istmo de Tehuantepec, que entre otras cosas sirvieron para facilitar el logro de consensos entre los principales actores del sector público y del privado, y que finalmente han culminado en los grandes proyectos de centrales eoloelectricas que actualmente se llevan a cabo en aquella región.



Pero la juventud no dura para siempre. Junto con el conocimiento y la experiencia ganados a lo largo del tiempo, también ha aumentado la edad de los investigadores y pronto la GER-IIE comenzará a descapitalizarse, a menos que se encuentre una fórmula para el remplazo oportuno de las capacidades perdidas. Incorporar al equipo a jóvenes talentos y retener hasta donde sea posible a los talentos ya no tan jóvenes son ciertamente elementos de esa fórmula, como lo son la vinculación y el trabajo en equipo con los talentos existentes en otras instituciones. Pero esto no será suficiente. Se requiere además renovar y actualizar los medios de trabajo (equipos, instrumentos, laboratorios, espacios, etc.) y las estructuras organizativas que permitan que el conocimiento y la experiencia fluyan de manera rápida y eficaz.

El campo de aprovechamiento de las energías renovables es por naturaleza multidisciplinario y se extiende a otras áreas fuera de las competencias del propio Instituto, pues involucra aspectos sociales, políticos y ambientales, entre otros. Integrar en los equipos de trabajo de energías renovables del IIE capacidades en estas áreas, mediante la vinculación u otros medios, se hará indispensable si es que el Instituto pretende mantenerse en el liderazgo de la disciplina de energías renovables en el nuevo contexto competitivo que genera la evolución del sector energético del país.



*Lo que hoy somos
descansa en lo que ayer pensamos,
y nuestros actuales pensamientos
forjan nuestra vida futura.*

Buda



Afrontando los retos de la reforma energética

Epílogo

Casi 40 años ha tomado caminar esta ruta, a lo largo de la cual se han tenido sueños, ilusiones, anhelos, y un deseo ferviente de alcanzar una meta que en un principio solo era una idea nebulosa, que poco a poco con el paso de los años y el conocimiento libado de quienes han ido por delante en estas lides, fue tomando forma y tornándose en una visión cada vez más clara.

Varios han quedado en el camino. De entrañable memoria la Maestra Ana María Martínez Leal, jefa fundadora de lo que hoy es la Gerencia de Energías Renovables del Instituto, mentora de muchos de nosotros, y a cuya memoria se dedica este libro; y Alfonso Félix Almada, grato amigo e incansable promotor de los biodigestores. Otros han preferido tomar distintas rutas y luchar en diversos frentes por un México mejor; demasiados como para ser enumerados aquí. Y los espacios que se han abierto han sido ocupados por jóvenes talentosos y llenos de energía que con su entusiasmo y cándida entrega al trabajo han servido de báculo a quienes ya al final de este camino, y cansados del mucho andar pero contentos con lo logrado, han tenido que aminorar el paso, o pararse a descansar a la vera del camino.

El equipo de trabajo de la GER-IIE en energías renovables no ha sido un grupo numeroso. Conserva prácticamente el mismo número de miembros que en los albores del Instituto. Pero al paso de los años otros grupos, en otras instituciones, han nacido, han crecido y se han fortalecido, con lo que se ha repartido la carga de llevar a las energías renovables al lugar que les corresponde en el menú energético de este país. No son ya solamente grupos técnicos. Los hay también en el ámbito no técnico de la política, la economía, las ciencias sociales, las finanzas. Hay ya también liderazgos dentro del ámbito político de nuestro país que creen en las energías renovables como un medio para lograr un mundo mejor, que emiten leyes para allanar el camino hacia este fin, que aprueban recursos económicos para instrumentar las soluciones. Finalmente, también hay ya un sector de la sociedad que ve en las energías renovables una solución a problemas ambientales globales, o de índole local o personal, y que están dispuestos a adoptarlas y a luchar porque se conviertan en un elemento importante en el menú de opciones energéticas de este país. Si el conocimiento y las experiencias generadas en el IIE, han tenido alguna influencia en el sentir, el pensar y el actuar de estos nuevos actores en el

escenario de las energías renovables en México, el esfuerzo realizado en el Instituto no habrá sido en vano.

Hace 40 años muy poco había en la oferta de energías renovables en el país. Ahora tenemos grandes centrales eólicas y solares. Miles de usuarios generan su propia electricidad con paneles fotovoltaicos, con plantas de biogás o con minicentrales hidroeléctricas. Muy pocas de las tecnologías que han sido desarrolladas en la GER-IIE han podido todavía entrar en el mercado. Algunas de las razones para ello se aducen en este documento. Pero por otro lado se han consolidado las capacidades necesarias para llevar a plena madurez aquellas tecnologías todavía en proceso de desarrollo, y se tienen casos de éxito en donde la contribución del IIE ha servido para allanar el camino para que otros logren sus propios objetivos en el campo de las energías renovables. Muchos han aportado en igual o mayor medida para construir el entorno favorable actual. Gracias a ello ahora tenemos un marco jurídico y regulatorio que ha facilitado el progreso, y hemos logrado ubicarnos como país en el grupo que transita hacia una economía baja en carbono. Pero todavía falta mucho por hacer.



Adiós IIE, bienvenido INEEL

El día 1 de diciembre del año 2015, al tiempo que en el Instituto los empleados festejaban con un enorme pastel los 40 años de existencia del Instituto, en la cámara de Senadores los legisladores aprobaban la Ley de Transición Energética mediante la cual se crea el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) sobre los cimientos de lo que hasta el momento de concluir este libro todavía era el Instituto de Investigaciones Eléctricas; el decreto presidencial por el que el IIE se convierte en el INEEL habría de ser emitido dentro de los seis meses siguientes al decreto de emisión de la Ley. La iniciativa para la Ley de Transición Energética fue elaborada por los legisladores del Partido Acción Nacional y dada a conocer públicamente en junio de 2014, como colofón del proceso de la reforma energética aprobada en 2013, y aprobada por los diputados de la LXIII Legislatura en diciembre de 2014 y enviada al Senado para su aprobación, lo que ocurrió el día 1° de diciembre de 2015. El Decreto Presidencial mediante el cual se expide la Ley de Transición Energética fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015.

En principio, el estatus jurídico y la estructura de gobernanza del INEEL no cambian de manera sustantiva en relación con lo correspondiente al IIE, pero habrá que esperar la expedición de su Reglamento Interior para conocer las disposiciones que definirán su naturaleza, constitución, operación y, desde luego, su presupuesto. Sin embargo, la Ley de Transición Energética es clara en cuanto al objeto del INEEL en lo que se refiere a las energías renovables, pues entre otras cosas le manda coordinar y realizar estudios y proyectos de investigación científica o tecnológica con instituciones académicas, de investigación, públicas o privadas, nacionales o extranjeras; brindar apoyo técnico y científico a las dependencias, organismos y empresas productivas del Estado y al sector privado; apoyar en la elaboración y actualización del Inventario Nacional de Energías Limpias; colaborar en la elaboración del Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias; patentar y licenciar las tecnologías desarrolladas y los resultados de la investigación que obtenga y que resulten procedentes; y, contribuir a la formación de especialistas e investigadores, e implantar cursos de especialización y actualización de conocimientos en ciencia, tecnología y administración. Funciones todas estas con antecedentes en las actividades del Instituto durante su existencia de 40 años.

Pero hay otras funciones que son inéditas y que seguramente requerirán de un análisis para definir los cursos de acción correspondientes dentro de la estructura que se establezca para el INEEL. Estas nuevas funciones incluyen: brindar apoyo técnico y científico a la SENER para formular, conducir y evaluar la política nacional en la materia; realizar análisis de prospectiva sectorial, y colaborar en la elaboración de estrategias, planes, programas, instrumentos y acciones relacionadas; evaluar el cumplimiento de los objetivos establecidos en la Ley, así como las metas y acciones contenidas en los instrumentos de planeación; emitir recomendaciones sobre las políticas; coadyuvar con la Secretaría en la elaboración de los instrumentos de planeación; promover, con la participación del CONACYT, la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico para la generación de electricidad con energías limpias; contribuir a la difusión e implementación, dentro de la industria eléctrica e industrias afines, de aquellas tecnologías relacionadas con la generación, transmisión, distribución y uso eficiente de energía eléctrica.

En cuanto a la Investigación Científica, la Innovación y el Desarrollo Tecnológico, la Ley establece que la Secretaría de Energía y el INEEL, con la participación que corresponda al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, promoverán la investigación aplicada y el desarrollo de tecnologías para el cumplimiento de las Metas en materia de Energías Limpias y Eficiencia Energética. Para ello, establece algunos criterios que incluyen, entre otros, el fomento al desarrollo de nuevos conocimientos, materiales, técnicas, procesos, servicios y tecnologías en materia de energías renovables; la viabilidad técnica, ambiental, financiera, administrativa, social y de ejecución de los proyectos; la vinculación de los resultados de la investigación científica, la innovación y el desarrollo tecnológico con el desarrollo económico y social tanto nacional como regional, poniendo especial atención en la generación de empleos; y la elaboración de una Hoja de Ruta para la formación de capacidades técnicas, de administración de la energía, de elaboración e implementación de políticas públicas en energía, y otras disciplinas necesarias para suplir las necesidades de capital humano de la Industria Eléctrica.



Un vistazo al futuro

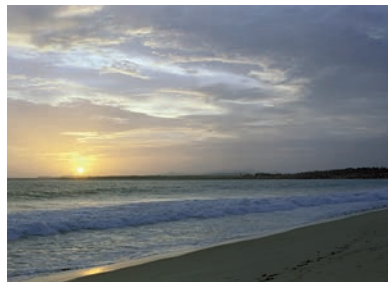
El reto por delante es enorme, como enormes son las oportunidades para poner en acción el talento, el conocimiento y la experiencia del grupo de trabajo que se forjó en el tema de energías renovables en el Instituto. La reforma energética, la ley de transición energética y la ley general de cambio climático, son apenas los primeros pasos que, de mantenerse firmes, habrán de cambiar el perfil energético de nuestro país hacia una economía menos petrolizada, más limpia y más sustentable. Es en este nuevo marco jurídico que tendrán que surgir las ideas innovadoras y las propuestas de proyectos que habrán de desarrollarse. Es también en este nuevo contexto que tendrán que crearse las nuevas capacidades y la nueva infraestructura para tomar el reto. La transición energética de una economía es un proceso largo, y en nuestro país seguramente tomará décadas, tanto por la fuerte dependencia del petróleo que actualmente tiene nuestra economía, como por el cambio de hábitos que tiene que darse en nuestra sociedad para adoptar las nuevas tecnologías y las nuevas formas de hacer las cosas.

La ruta hacia adelante no es del todo desconocida. La propia Ley de Transición Energética marca algunos de sus elementos, como es el caso de la creación de Centros Mexicanos de Innovación en Energías Limpias, a los que asigna la responsabilidad de desarrollar, proponer y, en su caso, implementar, Hojas de Ruta para desarrollar capacidades nacionales en el ámbito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación que permitan el óptimo aprovechamiento de las fuentes de Energías Limpias disponibles en el territorio nacional.

Por ejemplo, en el caso eólico, la puesta en marcha del CEMIE-E, aprobado para financiamiento en febrero de 2014 por el Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACYT, ha permitido dar ya los primeros pasos en la dirección señalada. Como se ha descrito, a lo largo de la existencia del IIE, se han identificado barreras que aún quedan por eliminar, limitaciones que superar, huecos que llenar, y problemas que resolver, para que el desarrollo de ésta y otras tecnologías de energías renovables en México ocurra de la forma más conveniente para el país y sus habitantes. Pues aun con los avances que se han tenido en materia regulatoria para la implementación de centrales eólicas y solares en el país, y que han llevado al otorgamiento de más de 9,000 MW y 7,000 MW, respectivamente, en permisos por parte de la Comisión Reguladora de

Energía para que las empresas públicas y privadas instalen capacidad de generación eléctrica, todavía no hay un programa de amplia visión para el desarrollo nacional de éstas y otras tecnologías, con metas estratégicas para el corto, mediano y largo plazos; ni mecanismos para incentivar y fomentar aplicaciones de las energías renovables, distintas e innovadoras en el ámbito nacional, tales como el bombeo, desalación o saneamiento de agua. Tampoco se han formulado e instaurado mecanismos para apoyar e incentivar la creación de nuevas fuentes de empleo en el sector de energías renovables o para dar impulso al desarrollo regional utilizando este recurso energético.

Como caso particular, se prevé que la capacidad eolieléctrica en México mantendrá una alta tasa de crecimiento al menos durante los próximos 20 años y, para construir las centrales, los aerogeneradores que hoy se instalan en México son todos de importación, con una vida útil estimada cercana a 20 años. Entonces, es pertinente preguntar si el remplazo al término de la vida útil de las máquinas se hará con aerogeneradores importados, o si se tomará la oportunidad para introducir tecnología nacional, reactivar industrias afines y crear otras nuevas, fomentando así la muy necesaria creación local de empleos. Otros países, notablemente Corea, China, India y Brasil, han optado por la segunda vía, con lo que han logrado un sitio muy competitivo en el concurso mundial de la tecnología eólica. México tiene los elementos para hacerlo, inclusive los recursos monetarios para lograrlo, como se ejemplifica con la decisión de invertir 111 millones de dólares del erario público para construir, en la modalidad de obra pública con ingeniería y tecnología importadas, la central eolieléctrica La Venta II de 83 MW. Consideraciones y preguntas similares son también pertinentes para otras tecnologías, como la fotovoltaica, la termosolar a concentración, la microhidráulica y las de biomasa, cuya aplicación masiva en México se vislumbra en el corto y el mediano plazo. En este orden de ideas se hace necesaria la creación de políticas que fomenten el establecimiento de una base industrial nacional que contribuya de manera importante al desarrollo económico y social del país, de tal manera que la aplicación de las energías renovables no se circunscriba a la importación de bienes y servicios.



Pero más allá de los temas relacionados con la fabricación local de tecnología en México, existen otros factores igualmente importantes relativos

a la estructura y las reglas del mercado de las energías renovables. La falta de normas técnicas y ambientales aplicables en el país para estas fuentes de energía, ha dado pie a la importación de tecnologías de mala calidad y a la implementación de proyectos social y ambientalmente poco sustentables. Así mismo, la falta de reglamentos o buenas prácticas, cuya implementación pueda ayudar a los propietarios de las tierras para negociar un trato digno y justo en el arrendamiento de sus parcelas para la construcción de proyectos de energía renovable, ha causado graves problemas socio-políticos, retraso o cancelación de inversiones, e incluso violentos conflictos.

La adecuada planeación del desarrollo energético renovable del país, tanto a nivel nacional como regional, debe considerar aspectos de política, economía, tecnología, medio ambiente, de infraestructura industrial, y de desarrollo social, entre otros. Esta multiplicidad de disciplinas requiere, desde luego, la participación concertada de expertos de los distintos campos para dar sentido a los planes que el país requiere. Los planes y programas especiales de energías renovables que hasta ahora se han producido en México han dejado mucho que desear, tanto en su orientación como en su contenido y en su visión cortoplacista, si se les compara con los correspondientes del resto de los países de la OCDE, grupo al que México optó por pertenecer y el cual debe de servirle como referencia. El resultado actual puede ser atribuido a la falta de ejercicios formales, rigurosos y de participación multidisciplinaria para trazar los mapas de ruta que se deben seguir en el país para lograr una verdadera transición. Sería un grave error dejar que el rumbo del cambio se trace solamente con base en los intereses de las fuerzas del mercado; o bien desde un escritorio con poco conocimiento y experiencia. Es ahora más que nunca necesario que se escuchen las voces de los especialistas, académicos e investigadores, que cuentan con conocimiento, experiencia, capacidad para el análisis, y visión de futuro. Hasta ahora, en México se les ha escuchado muy poco, no solo en el tema de las fuentes renovables de energía, campo en el que en algún momento se les llegó a desdeñar, sino también en muchas otras disciplinas. Durante sus 40 años de existencia, el Instituto creó, sugirió o propuso formalmente, alternativas para el desarrollo tecnológico de las energías renovables en México, no siempre con éxito; es de esperar que, en el entorno de la nueva Ley de Transición Energética, el INEEL le supere en el número de casos exitosos.

La falta o limitada disponibilidad de recursos económicos es mencionada en este libro como una causa recurrente por la que un impor-



tante número de proyectos se han quedado en el camino. La Ley de Transición Energética señala que habrá recursos de la Administración Pública Federal para los proyectos de innovación, lo que en principio puede alentar el trabajo de los investigadores. Es bien sabido que el presupuesto nacional para investigación y desarrollo tecnológico es limitado y está por debajo de lo que corresponde a un país con el grado de desarrollo económico que tiene México. Pero más allá de los montos, existe un problema de pulverización del recurso, ya que preferentemente se destina a financiar muchos pequeños proyectos de relativo bajo riesgo científico o tecnológico, en vez de concentrar los esfuerzos en proyectos de desarrollo tecnológico-industrial de mayor envergadura y largo aliento. A fin de subsanar esta deficiencia, la Ley establece lineamientos para el desarrollo industrial en materia de energías limpias, y ordena a la Secretaría de Economía, en coordinación con la Secretaría de Energía, que diseñe e instrumente una Hoja de Ruta para promover el desarrollo de las correspondientes Cadenas de Valor, para lo cual debe elaborar un estudio que determine las necesidades y el potencial de la Industria Eléctrica en este campo. La Hoja de Ruta deberá contar con instrumentos específicos para promover el desarrollo de las cadenas de valor, así como los apoyos dirigidos a pequeñas y medianas empresas para que emprendan este desarrollo; además, deberá promover la inversión en desarrollo tecnológico e innovación. Queda por verse si estos mecanismos vienen acompañados de reglas para mejorar la oportunidad en la disponibilidad de los recursos y la simplificación en los procedimientos para acceder a ellos.

El reto que impone la transición energética en materia de energías renovables amerita la implementación de un programa nacional de investigación y desarrollo tecnológico, de envergadura comparable a los de

países avanzados en esta materia, que no solamente se limite a solucionar la problemática asociada con la incorporación de estas alternativas en el sistema energético nacional, sino que permita, de manera organizada, decidida y sostenible, el desarrollo de tecnología propia; y que, en general, facilite la asimilación, internalización y aplicación de aquellos sistemas, configuraciones o elementos que ahora se están desarrollando o consolidando en los países avanzados, lo que podrá fomentar la creación de nuevo conocimiento y la multiplicación de innovaciones.

Pocos son los recursos humanos especializados en estos temas en comparación con la magnitud del reto. Transmitir los conocimientos y la experiencia de los especialistas ya formados a las nuevas generaciones de especialistas, constituye en sí mismo también un enorme reto, pues ya no se cuenta con los plazos de que el país dispuso para formar la generación actual de especialistas en energías renovables. Pero la premura no debe llevar a la improvisación en la formación de los nuevos cuadros, ya que hacerlo podría ser el preámbulo del fracaso.

El tiempo será testigo y alguien probablemente escribirá las experiencias vividas durante los primeros cuarenta años del INEEL.



INSTITUTO DE
INVESTIGACIONES
ELÉCTRICAS

Reforma 113,
col. Palmira,
C.P. 62490,
Guernavaca, Morelos, México
tel: 362 3811

www.iie.org.mx

