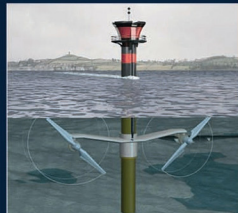


Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México

Claudio A. Estrada Gasca
Jorge Islas Samperio
Coordinadores



TEA



Energías Alternas:

Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México



Consejo Directivo de la AMC 2008-2010

Rosaura Ruiz Gutiérrez
Presidenta

Arturo Menchaca Rocha
Vicepresidente

Teresa Rojas Rabiela
Tesorera

Patricia Talamás Rohana
José Franco López
Secretarios



Consejo Directivo de la Academia de Ingeniería

Octavio Agustín Rascón Chávez
Presidente

José Antonio Ceballos Soberanis
Vicepresidente

José Luis Antón Macin
Secretario

Jesús Arnoldo Bautista Corral
Prosecretario

Ma. del Carmen Padilla Longoria
Tesorera

Rubén Barocio Ramírez
Protesorero

Norberto Domínguez Aguirre
Director Administrativo

Claudio A. Estrada Gasca
Presidente Comisión de Especialidad Energética



Universidad Nacional Autónoma de México

José Narro Robles
Rector

Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
Secretario General

Carlos Arámburo de la Hoz
Coordinador de la Investigación Científica

Claudio A. Estrada Gasca
Director del Centro de Investigación en Energía

Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México

Coordinado por
Claudio A. Estrada Gasca y
Jorge Islas Samperio



Academia Mexicana de Ciencias
“Casa Tlalpan” Km. 23.5
Carretera Federal México-Cuernavaca
Av. Cipreses s/n, Col. San Andrés Totoltepec,
Tlalpan, 14400, México, D. F.
Tels. 5849 - 4905 y 5849 - 5522
Fax: 5849 - 5112
e-mail: aic@servidor.unam.mx
<http://www.amc.unam.mx>

*Energías alternas: propuesta de investigación y desarrollo
tecnológico para México*

Primera edición 2010

D.R. © 2010. Academia Mexicana de Ciencias

Impreso y hecho en México

Resumen

Con el propósito de contribuir en la construcción de salidas viables a la situación energética actual del país y en la cimentación de un futuro sostenible, la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), la Academia de Ingeniería, en colaboración con varias entidades académicas de la UNAM, decidió organizar un Taller sobre Energías Alternas. Se planteó que en dicho Taller participaran especialistas de la comunidad científica y tecnológica del país, con el objeto de recoger sus opiniones en cada uno de los temas seleccionados y estructurar una estrategia que dibuje la trayectoria a seguir en el área de la Investigación y el Desarrollo Tecnológico (I&DT) en energías alternas, distintas a los hidrocarburos. Dicho Taller sobre Energías Alternas (TEA) se realizó del 28 al 29 de Agosto del 2008 en Cuernavaca, Morelos.

El objetivo del TEA fue la elaboración de un informe que contuviera información del estado del arte de las tecnologías, propuestas de líneas de investigación y acciones de lo que se debe hacer en ciencia y tecnología sobre cada alternativa energética en México. El presente documento es el informe que esperamos ayude a las organizaciones que promueven la investigación científica y tecnológica en México a orientar y optimizar los recursos económicos y humanos utilizados en la investigación, la transferencia de tecnología y el subsidio e inversión en infraestructura. También esperamos que contribuya a optimizar los recursos dirigidos a la generación de recursos humanos, la publicación y difusión, o a los asignados a la promoción y establecimiento de una industria para aprovechar íntegramente las energías renovables no convencionales en el país, con todos los beneficios económicos y ambientales que esto conlleva.

Los temas abordados en el TEA fueron trece, a saber: i) energía solar fotovoltaica, ii) energía solar de baja entalpía, iii) energía solar de alta entalpía, iv) bioenergía, v) energía eólica, vi) energía geotérmica, vii) energía hidráulica a pequeña escala, viii) energía oceánica, ix) energía en edificaciones, x) eficiencia energética, xi) hidrógeno y (xii y xiii) energía nuclear de fisión y de fusión. Los grupos de expertos por cada tema trabajaron en forma separada primero y después conjuntamente. Así, se pudieron identificar aspectos generales y se establecieron recomendaciones, también generales, para todas las energías alternas. Posteriormente, los diferentes grupos trabajaron en los informes por cada tema abordado.

Autores

Energía Solar Fotovoltaica

Antonio Jiménez González
Yasuhiro Matsumoto Kuwawara
Arturo Morales Acevedo
Aarón Sánchez Juárez

Energía Solar Térmica

Camilo A. Arancibia Bulnes
Roberto Best y Brown
Claudio A. Estrada Gasca
Wilfrido Rivera Gómez-Franco

Energía Geotérmica

Rosa María Barragán Reyes
Edgar Santoyo Gutiérrez

Energía Eólica

Marco Antonio Borja Díaz
Oscar A. Jaramillo Salgado

Bioenergía

Javier E. Aguillón Martínez
Jorge M. Islas Samperio
Alfredo Martínez Jiménez
Enrique Riegelhaupt

Energía Microhidráulica

Armando Trelles Jasso
Luis Héctor Valdés Báez

Energía Oceánica

Steven Czitrom Baus
José López González

Energía del Hidrógeno

José Anaya Izquierdo
Vicenzo Antonucci
Luis Gerardo Anaya Hurtado
Ulises Cano Castillo
Rubén Ornelas Jacobo
Joseph Sebastian Pathiyamattom

Energía Nuclear de Fisión

Juan Luis François Lacouture
Cecilia Martín del Campo Márquez

Energía Nuclear de Fusión

José Julio Emilio Herrera Velázquez
Martín de Jesús Nieto Pérez

Energía en Edificaciones

Anibal Figueroa Castrejón
Irene Marincic Lovriha
Manuel Ochoa de la Torre
Jorge Rojas Menéndez

Uso Eficiente y Ahorro de Energía

Odón de Buen Rodríguez
Rubén J. Dorantes Rodríguez
Augusto Sánchez Cifuentes

Equipo facilitador para la realización del Taller:

Moderadores: Arnoldo Bautista Corral, Lucie Burgaud, Eduardo Ramos, Hailin Zhao.

Equipo de Apoyo:

Alejandra Caballero, , Maribel Fernández, Genice Kirat Grande, Carlos Alberto Pérez, Alfredo Quiroz

Agradecimientos:

Se agradece a la M.C. Nora Lina Montes y a la L.I. Ma. de Jesús Pérez Orozco por el apoyo técnico en la elaboración de este manuscrito. Así mismo, se agradece la revisión general del documento a Rafael Loyola

Índice

Introducción	1
Metodología de trabajo	9
Aspectos generales que obstaculizan y favorecen a las EA	11
Energía solar fotovoltaica	15
Energía solar térmica de baja entalpía	27
Energía solar térmica de Alta entalpía	33
Bioenergía	41
Energía eólica	51
Energía geotérmica	59
Energía hidráulica a pequeña escala	73
Energía oceánica	77
Energía en edificaciones	81
Uso eficiente y ahorro de energía	89
Energía del hidrógeno	105
Energía nuclear de fisión	119
Energía nuclear de fusión	129



Introducción

Ante la situación energética mundial, México requiere un cambio de paradigma energético. Es inevitable preguntarse ¿con cuáles fuentes energéticas se puede enfrentar el agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles a fin de promover un desarrollo sostenible? Esto además se debe lograr sin tensiones geopolíticas por el control de los yacimientos de los hidrocarburos (HC) y sin la degradación irreversible del medio ambiente natural, particularmente el asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI's).

Creemos que el uso racional y eficiente de las actuales fuentes energéticas y las energías alternativas (EA), esto es, las energías renovables (ER) y la energía nuclear, son la solución a este problema. Lo anterior, bajo la premisa de que, por razones de seguridad nacional, en todo momento se deberá garantizar la oferta energética al país. Esto lleva a considerar todas las alternativas energéticas no fósiles y preferentemente aquellas de carácter sostenibles. Además, debemos agregar que el período de transición energética, cuyas primeras expresiones se dieron cuando EU alcanzó su pico de producción o *Curva de Hubbert*,¹ sugiere la necesidad de evolucionar de una matriz energética domi-

¹ El geofísico norteamericano M. King Hubert, en 1956 predijo que la producción de crudo de Estados Unidos debería alcanzar su pico entre 1965 y 1970, lo cual se cumplió en 1971. De ahí surge la teoría que lleva su nombre, acerca de la tasa de agotamiento a largo plazo del petróleo y de otros combustibles fósiles; ésta señala que la producción mundial de petróleo llegará a su cenit y después declinará tan rápido como creció, siguiendo el trayecto de una curva en “u” invertida. Resaltó el hecho de que el factor limitador de la extracción de petróleo es la energía requerida y no su costo.

nada por los HC, a otra lo más diversificada posible, en la que, una vez más, las EA jugarán un papel relevante.

De entre las EA, las fuentes renovables ocupan particular atención; éstas son aquellas que por su capacidad de regeneración natural y cantidad en relación a los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas, son inagotables y su explotación con responsabilidad poco afecta al medio ambiente;² por esta característica es que reciben su nombre y están consideradas como fuentes que permiten sostener el consumo. Estas son: la energía solar, la eólica, la biomasa, la geotérmica, las pequeñas centrales hidráulicas y la oceánica.

Varios países del mundo han reconocido lo anterior y desde hace varias décadas vienen trabajando en la investigación científica y tecnológica para aprovechar las ER, y la implantación de políticas y programas para su uso masivo. España es un claro ejemplo de ello, lo mismo que Alemania y otras naciones de la Unión Europea (UE). México, aunque tardíamente, empieza ha incorporarse a esta estrategia; recientemente ha contemplado la incorporación de tales fuentes en sus programas energéticos de mediano plazo. Sin embargo, es claro que todavía hay mucho por descubrir y desarrollar en este campo.

México cuenta con abundancia de recursos en ER (mucho más que de HC) y con capital humano capaz de generar investigación y desarrollos para apropiarse o crear las tecnologías necesarias para su aprovechamiento, al igual que para promover una industria nacional.

Ello implicaría la creación de decenas de miles de puestos de trabajo, más ahora con la promoción mundial de los “empleos verdes”³. Así, el país

² Esto, contrario a los combustibles fósiles, cuyo impacto ambiental adverso se da en todo el ciclo de vida, tanto del energético como de su tecnología, es decir, desde la exploración hasta el consumo. En el caso de las ER, tal efecto contaminante no se presenta durante la fase de operación, aunque sí en otros segmentos de sus ciclos de vida, particularmente en la fabricación de la tecnología que aprovecha a las ER. Esto último cambiará cuando toda la matriz energética esté basada en EA.

³ Los “empleos verdes” se definen como aquellos relacionados con la protección de los ecosistemas, mediante la reducción de la contaminación y del consumo de energía y con ello la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero y su impacto en el planeta. De aquí que, este tipo de trabajos se vinculen fuertemente con la industria energética y se caractericen por la mejora de su eficiencia operativa y la sustitución de combustibles fósiles con fuentes renovables.

tiene una gran oportunidad, no sólo de satisfacer sus necesidades energéticas, sino de desarrollar, en los próximos años, tecnología propia en este campo. Para ello se requiere, primero, de la voluntad política de Estado y, segundo, que los tomadores de decisión cuenten con un conocimiento amplio sobre la importancia y las implicaciones virtuosas para la Nación de comprometerse decididamente en todo lo relativo al desarrollo endógeno de las ER.

De lo anterior se deriva la necesidad de estudiar la situación actual y las perspectivas de desarrollo de dichas fuentes de energía, con miras a promover e implantar las medidas necesarias que permitan disminuir la fuerte dependencia que hoy tiene el país de los HC. Lo anterior hace necesario fortalecer los factores requeridos para el aprovechamiento de las EA, con énfasis principal en aquellas de carácter renovable, al tiempo de desarrollar un nuevo modelo de consumo, que sea acorde con la disponibilidad nacional de los recursos energéticos.

Si se está buscando seguridad y autosuficiencia en el ramo, la política que se diseñe en materia de energía deberá tener como elementos indispensables: el plan para la formación de recursos humanos altamente calificados, el fortalecimiento de las instituciones dedicadas a la investigación y el desarrollo tecnológico, y la creación de otras actividades pertinentes, articuladas entre sí, con financiamiento generoso y con objetivos claramente establecidos.

Cualquier plan que se elabore deberá tener una visión nacionalista, es decir, orientada a reencauzar el desarrollo nacional basado en el aprovechamiento de sus propios recursos, de largo alcance e incluyente, equitativa y cuidadosa del medio ambiente. Todo ello con el fin de evitar los errores que hoy llevan al país a responder de manera reactiva, en lugar de preventiva, ante problemas previsibles, como el del agotamiento de nuestro recurso energético predominante: los HC.

Esto lleva a la urgencia de promover una reforma integral del sector energético, más aún considerando la relevancia que tiene en el desarrollo de México. Al parecer y desafortunadamente, una reforma con tal característica aún está ausente en los tomadores de decisión, tanto en el poder Ejecutivo como en el Legislativo.

La situación energética actual es clara cuando se revisan las recientes iniciativas en materia petrolera, que sigue priorizando la (sobre) explotación y (sobre) exportación del crudo, impulsadas por la captación de su renta para solventar la baja recaudación fiscal y con ello la reducción de los ingresos gubernamentales; en adición, desde hace cerca de un cuarto de siglo, se ha renunciado a la integración de las cadenas productivas del propio sector (incremento de su valor agregado hasta la petroquímica secundaria) y se ha desatendido la modificación de la matriz energética, hacia un mayor equilibrio en la participación de cada fuente.

Todo esto a pesar de que México dispone de reservas de crudo para tan sólo unos cuantos años; cada día disminuye la producción nacional por la declinación de Cantarell, que actualmente tan sólo produce el 25% del total⁴. Considerando las reservas probadas y los ritmos de producción actual, México cuenta con petróleo disponible solo por 9.3 años. Esto lleva, una vez más, a concluir que es imprescindible implantar medidas que contrarresten un eventual desabasto energético, además de las medidas petroleras que ya se están tomando, a través de la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes renovables y la implementación de programas de uso racional y eficiente de la energía.

Esta situación es posible que se agrave, en lugar de remediarse, debido a que, según la AIE, la demanda mundial de petróleo llegará a 116 Mbd en 2030 (de un valor de 84 Mbd en 2005), lo que equivale a un incremento de 38% en ese periodo. Cabe entonces preguntarse si México seguirá ocupando un lugar importante en la lista de los países exportadores, como lo es actualmente, o pasará a la de importadores, dado el deterioro del sector petrolero.

Adicionalmente, es un lugar común decir que la producción de gases de efecto invernadero, principalmente el bióxido de carbono, son los precursores del incremento de la temperatura media global y del llamado cambio climático, con todas las consecuencias que ello implica.

Por todo mismo, es urgente una utilización más racional de la energía convencional y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energía. Para ello se requiere de una política energética que nos permita dis-

⁴ Valor promedio, de acuerdo con las cifras de enero a julio de 2009, que pasó de 28.8% a 23.0%. Cálculo propio con base en SIE-Sener.

minuir la actual dependencia del petróleo e impulsar la transición hacia las energías alternas, renovables y nuclear.

En años recientes se han realizado varios esfuerzos hacia el establecimiento de una política pública de apoyo a las ER. En diciembre del 2005 la Cámara de Diputados aprobó la iniciativa de Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (LAFRE), en la que se establecía la creación de un programa para el aprovechamiento de estas fuentes que se iba a sostener a través de incentivos provenientes de varios fondos, a saber: el fondo verde, las tecnologías emergentes, la electrificación rural, los biocombustibles y fondos para la promoción de las ER, así como para la investigación y el desarrollo tecnológico de las ER, estableciendo como meta, para el 2012, un porcentaje mínimo de su participación del 8% respecto a la generación total de electricidad del país. Sin embargo, esta iniciativa de ley no fue ratificada en el Senado.

En 2006, y gracias al trabajo del poder legislativo federal, se presentó la propuesta de reforma a la Ley Federal de Derechos en Materia de Hidrocarburos, la cual fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de enero de 2007. Esta reforma establece un pago anual del derecho correspondiente al 0.65% del valor anual del petróleo crudo y gas natural extraídos en el año, para la investigación científica y tecnológica en materia de energía, del cual el 20% se destina al Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética que tiene como objeto la investigación científica y tecnológica aplicada, tanto a fuentes renovables de energía, eficiencia energética, uso de tecnologías limpias y diversificación de fuentes primarias de energía. Es importante señalar que dichos proyectos serán realizados exclusivamente por los institutos de investigación y de educación superior del país.

En 2009, y también gracias al trabajo del poder legislativo en el marco de las discusiones de la Reforma Energética, se promulgo la *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*, la cual se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 28 de noviembre de 2008. Esta ley tiene como objeto regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para

el financiamiento de la transición energética. La ley prevé la creación de un fondo público, a saber, Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía que servirá para financiar la estrategia nacional correspondiente. Por último, la nueva ley obliga a la SENER a elaborar el Programa Especial de Aprovechamiento de las Energías Renovables (PEAER) el cual ya fue publicado en 2009 y contiene los objetivos y metas específicas de participación de las energías renovables, cuya primera versión establece una participación en la generación total de electricidad del país de entre el 4.5 - 6.6% en el 2012. En el transitorio décimo primero se estableció que en el presupuesto de egresos de la federación, para el ejercicio fiscal 2009, 2010 y 2011, se destinarán 3000 millones de pesos para el fondo mencionado.

No obstante estas importantes cantidades, el uso de estos fondos genera dudas sobre su capacidad para el aprovechamiento de las energías renovables y la transición energética ya que en su debut, en el ejercicio fiscal 2009, si bien los recursos para la promoción de ER y EE ascendieron a un total de 4,310 millones de pesos y que en términos porcentuales 75.05 correspondió a las ER, el análisis más detallado muestra que CFE absorbe el 67% de este valor, del cual 66% lo destinará a la operación y mantenimiento de las centrales eólicas y geotérmicas en operación y sólo el 1.4% a nuevos proyectos de ER (1% a un sistema híbrido gas natural -solar térmico- y 0.4% a una planta piloto sobre energía del oleaje); el restante 8.04% para las ER se destinará a la gestión de organismos como la CONUEE y acciones menores de SAGARPA en el área rural.

No obstante los recientes pasos a favor de las energías renovables, las dudas sobre si los fondos para la promoción de las ER y el uso eficiente de la energía serán realmente efectivos para lograr una transición energética en México, los expertos en las ER proponen que para realizar la transición energética con mayor rapidez y eficacia es necesario, entre otras acciones, promover a nivel legislativo la creación de una Comisión Nacional de las Energías Renovables (CNER) que atienda la evaluación y promoción de las ER; de un Instituto Nacional de Energías Renovables (INER) que trabajando en red con todos los centros y grupos de investigación en las diferentes tecnologías, sea el brazo tecnológico de la CNER y contribuya al desarrollo de la tecnología mexicana que deberá dar soporte a la industria nacional emergente en el ramo. También

se deberá elevar a rango constitucional el aprovechamiento de estas energías, y mandar por ley el establecimiento de las metas cuantitativas de mediano y largo plazo que habrán de alcanzarse.

Con el propósito de contribuir a la construcción de salidas viables a la situación energética actual del país y a un futuro sostenible, la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), en colaboración con algunas entidades académicas de la UNAM, decidió organizar tres talleres sobre energía, a saber; uno sobre Hidrocarburos, otro sobre Energías Alternas y uno más sobre Energía, Medio Ambiente y Cambio Climático. Se planteó que participaran especialistas de la comunidad científica y tecnológica del país, con el objeto de recoger sus opiniones en cada uno de los temas seleccionados y estructurar una estrategia que describa la trayectoria a seguir en el campo de la Investigación y el Desarrollo Tecnológico (I&DT) Energético. Este documento presenta los resultados del Taller sobre Energías Alternas (TEA) que se realizó del 28 al 29 de Agosto del 2008 en Cuernavaca, Morelos.



Metodología de trabajo

El objetivo del TEA fue la elaboración de un documento que contenga un informe del estado del arte y propuestas de líneas de investigación y acciones de lo que se debe hacer en ciencia y tecnología sobre cada alternativa energética para México, animados con el interés ayudar a las organizaciones que promueven la investigación científica y tecnológica en México a orientar y optimizar los recursos económicos y humanos utilizados en la investigación, la transferencia de tecnología y el subsidio e inversión en infraestructura. También esperamos contribuir a la optimización de los recursos dirigidos a la generación de recursos humanos, la promoción de una industria que aproveche íntegramente las energías renovables no convencionales en el país, con todos los beneficios económicos y ambientales que esto conlleva.

La dinámica seguida fue desarrollar un plan estratégico, a través de un ejercicio en cuatro fases, en las que se respondieran los siguientes cuestionamientos centrales: (1) ¿dónde estamos?, (2) ¿qué debemos investigar?, (3) ¿qué nos puede ayudar y qué nos obstaculiza?, y (4) ¿qué estrategia seguir?

La primera fase, ¿dónde estamos?, consistió en conocer el estado del arte de cada energía analizada, a nivel mundial y nacional, tanto en términos de la investigación en proceso como de sus avances tecnológicos, información que permitió a los participantes iniciar la discusión a partir de una plataforma de conocimiento común.

La segunda, ¿qué debemos investigar?, buscó la proyección del futuro deseable a mediano plazo (10 años) para la participación de las FER, como base para la definición de una propuesta sobre las líneas de investigación que se deben desarrollar en México en este mismo período.

La tercera etapa, ¿qué nos puede ayudar y qué nos obstaculiza?, realizó un ejercicio FODA, es decir, se interesó en determinar cuáles son las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que apoyan u obstaculizan las líneas de investigación propuestas.

La cuarta y última, ¿qué hacer?, se encaminó a puntualizar las estrategias, estructuradas en un plan que permitiera implantar las líneas de investigación antes definidas, tomando en cuenta los elementos identificados en el ejercicio anterior (FODA).

La metodología seguida en el TEA consistió en dirigir la discusión a través de un moderador que, por un lado, expusiera las premisas de partida y, por el otro, buscara que las ideas expuestas fueran claras, precisas, concisas y controlables, es decir, seleccionando en cada grupo a la persona que expresara la decisión del conjunto, una vez consensuada. Tales premisas fueron: los participantes (a) son expertos que cuentan con información clave sobre cada tema y (b) son responsables de sus aportaciones y tienen autoridad sobre el contenido de éstas.

Los temas abordados en el TEA fueron 13, a saber: (i) energía solar fotovoltaica (ii) energía solar de baja entalpía, (iii) energía solar de alta entalpía, (iv) bioenergía, (v) geotermia, (vi) hidráulica a pequeña escala, (vii) eólica, (viii) oceánica, (ix) hidrógeno, (x, xi) nuclear de fisión y de fusión, (xii) eficiencia energética y (xiii) energía en edificaciones. Los grupos de expertos por cada tema trabajaron en forma separada, primero, y después todos juntos. A continuación se presentan los aspectos generales que se obtuvieron de esta reunión y posteriormente en secciones separadas, se presentan los informes realizados por cada grupo de expertos.

Aspectos generales que obstaculizan y favorecen a las EA en México

Como parte del ejercicio de planeación que se realizó con el grupo de especialistas, se logró identificar los aspectos más importantes que obstaculizan y favorecen tanto el fomento y desarrollo de las EA, como aquellos de su Investigación y el Desarrollo Tecnológico en el país.

Como obstáculos, se encontraron la falta de:

- Recursos humanos especializados; los existentes están dispersos
- Recursos económicos y materiales suficientes para el desarrollo de la I&DT, innovación, creación de patentes, desarrollo de proyectos piloto y su escalamiento a nivel industrial.
- Programas amplios de fomento de las ER; los actuales son muy acotados.
- Estrategia para la atracción de financiamiento nacional e internacional.
- Coordinación interdisciplinaria e interinstitucional.
- Conocimiento de los recursos humanos existentes y de planes para su formación especializada.
- Infraestructura de I&DT adecuada para los retos que tiene el sector energético.
- Programas de I&D con objetivos y metas específicos con presupuestos congruentes.
- Redes para la investigación y desarrollo.

- Información y difusión de las fuentes de EA.
- Experiencia en innovación y transferencia tecnológica.
- Cultura científico-tecnológica, en particular en el área energética.
- Interés y conocimiento de cómo llevar los logros hasta la etapa de patente y transferencia tecnológica.
- Planeación y organización en el trabajo científico.
- Análisis del ciclo de vida de las tecnologías.
- Desarrollo de programas de cómputo especializados a cada fuente.
- Modelación de la transición energética para evaluar sus requerimientos y efectos.
- Vinculación de la academia con la industria.
- Participación del sector productivo.
- Planificación del sector energético a mediano y largo plazos, con objetivos y metas definidas.
- Voluntad política para el que el país desarrolle tecnología propia y reduzca su fuerte dependencia del exterior.
- Análisis sobre el impacto favorable de la explotación de las ER.
- Flexibilidad institucional: la actual es rígida, gruesa, inmóvil, con una burocracia insensible, con personal sindicalizado ineficiente y con protocolos complejos para el trámite de conexión a la red.
- Conexión con las necesidades del mercado.
- Avance tecnológico; existe un rezago tecnológico muy importante.
- Coordinación de esfuerzos; existe una propensión a la dispersión y duplicación de esfuerzos.

- Normalización; se tiene la necesidad de reglamentación, de instituciones de certificación e instrumentos legales suficientes.
- Continuidad en proyectos; se registra interrupción de proyectos por razones políticas (vg cambio de gobierno) y presupuestarias.
- Priorización a las EA; existe una baja prioridad por parte del gobierno a las EA.
- Las autoridades que apoyan y promueven la I&DT en el área de la energía no tienen la formación necesaria para realizar adecuadamente la toma de decisiones.
- Deficiencias y alta discrecionalidad en los sistemas de evaluación de las actividades de I&DT, tanto por parte de las instancias que las apoyan (CONACYT) como al interior de las propias instituciones que las desarrollan.
- Subsidio a los energéticos convencionales.
- Implantación de proyectos renovables, sin considerar los impactos socio-económicos en las comunidades donde se instalan (v.g. el parque eólico La Venta en Oaxaca).

Como aspectos favorables para las EA se encontraron los siguientes:

- Existencia de un marco normativo de promoción: la Ley de Fomento a la ER y la de los bioenergéticos, aún cuando requiere de mecanismos que garanticen el cumplimiento de sus objetivos.
- Recurso energético renovable abundante.
- Investigadores, los que hay, con alto nivel y competencia académica: fortaleza en recursos humanos.
- Centros de investigación que apoyan la I&DT y la formación de recursos humanos.
- Existencia de recursos humanos formados y calificados en todos los niveles (licenciatura, maestría, doctorado).

- Madurez de la comunidad científica en algunas áreas.
- Cooperación internacional y conocimientos y experiencias mundiales accesibles.
- Conocimiento y experiencia de grupo.
- Infraestructura académica y científica en diversas instituciones públicas.
- Capacidad industrial instalada de sistemas FER en generación eléctrica, en menor medida en biogás e iniciándose en biocombustibles.
- Interés de inversionistas.
- Combate al cambio climático y la cada vez más imperiosa necesidad de reducir las emisiones de gases efecto invernadero.
- Mercado de carbono a través del mecanismo de desarrollo limpio.
- Precios variables -en general al alza- de los combustibles fósiles (sobre todo HC).
- Declinación de los HC convencionales.
- Necesidad de seguridad y de un esquema energético sostenible.
- Prerrogativa de las FER de solventar simultáneamente el abasto energético y el abatimiento de la contaminación ambiental y de las emisiones de GEI que en conjunto coadyuvan al desarrollo sostenible.
- Política de diversificación energética y de fomento a las FER en proceso.

Finalmente, en las diferentes secciones temáticas del presente Informe se presentará una descripción más amplia y, sobre todo, una serie de recomendaciones en cuanto a la I&DT que se debe realizar en el país, a fin de que estas fuentes avancen de manera efectiva y sean parte, en el corto plazo, de la matriz energética nacional.

Para tal efecto, se tomaron los elementos aportados por todos los participantes al Taller, recogiendo las aportaciones expuestas en las sesiones de trabajo. Igualmente, los coordinadores realizaron una investigación para completar o actualizar algunos aspectos de cada uno de temas abordados.



Energía solar fotovoltaica

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

A la transformación directa de la luz solar en electricidad en un dispositivo optoelectrónico se le llama Efecto Fotovoltaico (FV). A la energía generada mediante este proceso se le conoce como Energía Solar Fotovoltaica. Dicho fenómeno se lleva a cabo en dispositivos o uniones formados por sólidos, líquidos y gases, pero es en sólidos, especialmente en los llamados semiconductores, donde se han observado las mayores eficiencias de conversión de potencia luminosa (luz) a potencia eléctrica (electricidad). La unidad mínima de transformación en donde se realiza el efecto FV se llama celda solar. La electricidad que se genera es del tipo directo o corriente directa (CD). Las celdas solares se asocian o agrupan mediante conexiones en serie o en paralelo para aumentar la potencia de generación y formar los llamados módulos FV's, y éstos conectados en serie o en paralelo para formar los arreglos FV's. Independientemente del tipo de agrupación eléctrica entre las celdas y/o los módulos solares, a las tecnologías de transformación de luz a electricidad se les llama comúnmente generadores fotovoltaicos.

Las celdas solares y los módulos fotovoltaicos se especifican y comercializan por la potencia máxima o potencia pico que pueden generar cuando sobre ellos incide una irradiancia de 1,000 W/m² llamada el pico de la radiación solar.

Los generadores fotovoltaicos son usados para suministrar electricidad a cualquier aparato eléctrico en CD tales como motores, lámparas, baterías para almacenar energía, y cualquier aparato electrodoméstico en corriente alterna

(CA), sólo que en este caso es necesario usar un acondicionador de energía que transforme la CD en CA. Con este tipo de acondicionadores es posible que un sistema FV opere en paralelo e interactúe con la red de corriente alterna convencional. El acoplamiento entre el generador FV, el acondicionador y sistema de almacenamiento de energía, y las cargas a energizar se les conoce con el nombre de sistema fotovoltaico.

Perspectiva histórica

La historia del efecto fotovoltaico comienza en 1839 cuando E. Becquerel observó “la generación de corriente eléctrica en una reacción química inducida por luz”. Varias décadas después, en la época de los 70’s del mismo siglo, un efecto similar fue observado en sólidos, en especial en selenio. En 1930, Lange, Schottky and Grondhal reportan eficiencias de conversión del 2% en celdas basadas en Selenio (Se) y Cu_2O . Sin embargo, se tuvo que esperar el avance de la ciencia, en especial en Física Cuántica, para dar una explicación fundamental del fenómeno fotovoltaico. Posteriormente, el desarrollo de la teoría del Rectificador de Estado Sólido (diodo) llevado a cabo por Mott y Schottky a principios de la década de los 40’s (siglo XX) y el invento del transistor por Bardeen, Brattain y Shockley en 1949, abrieron el camino al descubrimiento de la primera celda solar de silicio cristalino. Este descubrimiento se llevó a cabo en 1954 en los Laboratorios Bell y fue realizado por Chapin, D.M. y colaboradores, quienes reportaron una eficiencia de conversión, de energía solar a electricidad, del 6%. Aunque la tecnología involucrada era muy cara, el inicio de la era espacial en los años 1960’s dio a las celdas solares su primer nicho de aplicación real. Posteriormente, en los años 1970’s, gracias a la crisis petrolera, las actividades de investigación trajeron como beneficio mejoras en los procesos de elaboración y un aumento en la eficiencia de conversión, lo que ayudó a reducir los costos de fabricación abriendo la oportunidad de usar dichos dispositivos para energizar aparatos eléctricos de bajo consumo eléctrico en localidades remotas.

A partir de la misma década, se inicia una labor exhaustiva en investigación y desarrollo tecnológico para aumentar la eficiencia de conversión y abaratar los costos de fabricación, lo que ha permitido desarrollar sistemas

fotovoltaicos para aplicaciones residenciales y comerciales, tanto para sistemas autosustentados en localidades remotas o para interactuar con la red eléctrica convencional.

Los sistemas FV se han usado para proveer de electricidad en clínicas rurales, refrigeración de vacunas, telecomunicaciones, educación a distancia, telefonía rural, sistemas de señalización marina, bombeo de agua y desarrollo de agronegocios.

Actualmente, gracias a los programas fomentados y desarrollados en USA, Japón y Europa, la industria fotovoltaica crece a una tasa anual del 20% acelerando la rápida implementación de dicha tecnología en edificios urbanos interconectados a la red eléctrica convencional.

Perspectivas de aplicación a una escala masiva

La energía solar fotovoltaica ha sido identificada como una tecnología de rápido crecimiento con un potencial de aplicación alto. Por ser modular, puede ser usada en muchas aplicaciones. El mayor obstáculo para su uso en gran escala es el alto costo de inversión inicial. Los costos de generación de electricidad están entre los \$ 0.50 hasta \$ 2.00 US dolar por kW-hr para diferentes tamaños y configuraciones de sistemas y localidades. Como resultado, el uso de los generadores fotovoltaicos está limitado a aplicaciones en las que el costo de introducción de la red eléctrica convencional y del consumo de la electricidad es alto, o bien donde es necesario un generador limpio, silencioso y confiable. Este es el caso de áreas remotas (electrificación rural, telecomunicaciones, bombeo de agua, señalización, etc.) o para amortiguar los picos de consumo altos en fábricas o edificios. Sin considerar el costo inicial de inversión, la popularidad de la tecnología fotovoltaica se basa en su fácil uso, confiabilidad, relativo bajo mantenimiento y la disponibilidad del recurso solar. Debido a que son modulares, los sistemas fotovoltaicos pueden ser dimensionados para satisfacer las necesidades exactas de energía del usuario, disminuyendo el costo global sistema e incrementando la eficiencia del mismo. Conforme aumentan las necesidades energéticas del usuario, el tamaño energético del sistema se puede expandir.

Así, el binomio de generación limpia de electricidad: energía solar y tecnología fotovoltaica (FV), representan una alternativa ecológica para la generación de electricidad, de forma distribuida o centralizada, con aplicaciones en las zonas rurales y urbanas, que puede resolver problemas eléctricos desde unos cuantos Watt hasta MegaWatt, como ha sido demostrado por un sin número de proyectos tanto a nivel nacional como a nivel mundial.

Aunque la tecnología FV ha sido usada ampliamente en donde se carece de electricidad, una de las aplicaciones en el ámbito urbano que actualmente ha despertado el interés internacional es la interacción con la red eléctrica convencional (REC), creándose el concepto de autoabastecimiento residencial. Como los sistemas interactúan con la REC, se han establecido una serie de regulaciones técnicas y legales que han fomentado su uso más amplio bajo el concepto de medición neta.

Bajo el esquema anterior, desde hace más de 5 años países como Alemania y España han impulsado una serie de acciones de fomento del uso de los generadores FV's mediante regulaciones legales que han propiciado una gran demanda de dichos sistemas interconectados a la red. Esto ha propiciado un incremento en las líneas de fabricación y un impulso a la I&D+i en la tecnología FV que ha traído como consecuencia un incremento en la potencia producida de más del 50% por año y una producción mundial anual creciente que en el año 2008 alcanzó una producción mundial acumulada de 7,910 MW.

Tanto la demanda observada derivada del fomento como el incremento en las líneas de producción con el escalamiento a grandes volúmenes y la aparición en el mercado de nuevas tecnologías FV's debido al impulso en I&D+i, como es el caso de las celdas solares basadas en telurio de cadmio (CdTe) y cobre-indio-galio-selenio (CIGS), ha traído como consecuencia una reducción en el costo de fabricación y el precio de venta al usuario. Esta reducción abre una expectativa mayor del uso de los generadores fotovoltaicos para suministro de energía eléctrica, y se espera que el mercado de los generadores fotovoltaicos se expanda rápidamente cuando la electricidad generada pueda ser colocada, en la red pública, a costos que sean comparables con los de generación de electricidad por medio de combustibles fósiles (entre \$0.50 y \$2.50 pesos por kW-hr para usuarios domésticos).

Prospectiva económica

Los GFV's han sido identificados como una tecnología de rápido crecimiento con un potencial de aplicación alto. Por ser modular, puede ser usada en muchas aplicaciones. El mayor obstáculo para su uso en gran escala es el alto costo de inversión inicial ya que, con precios al público para la tecnología que pueden fluctuar desde US\$4.31 a US\$6.00 por W-pico⁵ y hasta US\$10.00 por W-pico instalado en el medio urbano, con sistemas típicos de 1.0 kW-pico para una generación promedio diaria de 4.0 kW-h⁶, la inversión inicial estaría alrededor de US\$10,000.00, por lo que muy pocos usuarios podrían adquirir dichos dispositivos si es que no se proporcionan líneas de crédito y beneficios fiscales. El precio promedio internacional más bajo para módulos mayores de 125 W-pico es de US\$2.50/W-pico para la tecnología de silicio monocristalino, US\$2.48 para módulos de silicio policristalino, y US\$1.76 para módulos de película delgada⁷.

Al evaluar el costo de la electricidad producida por los GFV's mediante modelos económicos basados en el tiempo de vida útil de la tecnología, se puede determinar que éste se encuentra entre US\$0.20 hasta US\$2.00 por kW-hr para diferentes tamaños y configuraciones de sistemas y localidades⁸, que al compararse con el costo de la electricidad convencional es de 5 a 10 veces más cara. Como resultado, el uso de los GFV's ha estado limitado principalmente en aplicaciones en las que el costo de introducción de la red eléctrica convencional y del consumo de la electricidad es alto, o bien donde es necesario un generador limpio, silencioso y confiable. Este ha sido el caso de áreas remotas (electrificación rural, telecomunicaciones, bombeo de agua, señalización, etc.) o para amortiguar los picos de consumo altos en fábricas o edificios.

⁵ Rango de valores para México obtenidos de listas de precios de compañías mexicanas que pertenecen a la Asociación Mexicana de Proveedores de Energías Renovables (www-amper.org).

⁶ Energía estimada con un recurso solar promedio diario de 5.0 kW-h/m² con un rendimiento del 80% para la tecnología.

⁷ Obtenidos de listas de precios de proveedores internacionales en la red electrónica: www.solarbuzz.com

⁸ Valores calculados con el método del valor presente neto.

Sin considerar el costo inicial de inversión, la popularidad de la tecnología fotovoltaica se basa en su fácil uso, confiabilidad, relativo bajo mantenimiento y la disponibilidad del recurso solar. Debido a que son modulares, los sistemas fotovoltaicos pueden ser dimensionados para satisfacer las necesidades exactas de energía del usuario, disminuyendo el costo global del sistema e incrementando el rendimiento del mismo. Conforme aumentan las necesidades energéticas del usuario, el tamaño del sistema (potencia) se puede incrementar.

Otro factor que hacen atractivos a los GFV's desde el punto de vista energético y ambiental es el corto tiempo en que dichos generadores retornan la energía usada para fabricarlos, conocido comúnmente como tiempo de retorno energético EPBT (por sus siglas en inglés: energy payback time). Asumiendo un periodo de 30 años de desempeño a un 80% de la potencia especificada, la tasa de retorno energético no es mayor de 3 años, aún así para la tecnología que demanda más energía como lo es las celdas de silicio monocristalino⁹; es decir, la energía requerida para producir el sistema no excede al 10% de la energía total generada por el mismo durante su tiempo de vida de operación.

Se espera que el mercado de los GFV's se expanda rápidamente cuando la electricidad generada pueda ser colocada, en la red pública, a costos que sean comparables con los costos de generación de electricidad por medio de combustibles fósiles (entre US\$0.08 y US\$0.10 por kW-hr para aplicación residencial; entre US\$0.05 y US\$0.07 por kW-hr para venta en el servicio público). Este punto puede alcanzarse a mediano plazo con la tecnología del silicio cristalino solo si la demanda del mercado se incrementa en un 35%¹⁰ trayendo como consecuencia una reducción de los costos de fabricación de los sistemas fotovoltaicos; o bien, con nuevas tecnologías emergentes de semiconductores de película delgada.

El comportamiento del precio de venta por W-pico en función de las ventas acumuladas desde 1976 a la fecha, muestra que en la medida en que la

⁹ Ver trabajo de: V. Fthenakis and E. Alsema; "Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external cost: 2004-early 2005 status"; Progress in Photovoltaics, V 14 No.3, pp275-280, 2006.

¹⁰ Estimaciones realizadas suponiendo un incremento en el mercado del 35% anual: David E. Carlson; "The Prospect for Low-cost Photovoltaic Electricity"; BPSolar october 16, 2007.

demanda se ha ido incrementando, el precio de la tecnología ha ido disminuyendo. De acuerdo a este comportamiento una proyección de ésta trayectoria hasta el año 2027 (entre 2025 y el 2030) indica una reducción de hasta \$1.00 dólar por W-pico. Bajo este supuesto, el costo de la electricidad para un sistema doméstico es de la misma magnitud que la electricidad comprada al suministrador de potencia eléctrica.

Es claro que para fomentar el uso de la tecnología FV, es necesario contar con esquemas de financiamiento y estímulos fiscales que propicien el incremento en su demanda e implementación y puesta en operación de proyectos energéticos. Sin embargo, aún sin dichos esquemas, por ser una tecnología de larga duración con garantías de hasta de 25 años con tiempos de operación estimados de más de 50 años, ésta induce a posibles usuarios a considerar inversiones en el presente que garanticen la producción de su energía eléctrica en el futuro.

Sin considerar la reducción en costos de fabricación debido a factores de demanda, científicos e ingenieros en todo el mundo están trabajando sobre el desarrollo de celdas solares con una mejor razón costo/desempeño. Esto se puede hacer aumentando la eficiencia de conversión de los GFV's, reduciendo su costo de elaboración, o la aplicación de nuevos materiales basados en películas delgadas. Es importante notar que aparte del mejoramiento en el proceso de elaboración, el escalamiento de la producción en grandes volúmenes es un requisito importante para la reducción de costos.

Situación en México

En el caso de nuestro país, las aplicaciones rurales de los GFV's son las que más se han fomentado por los diferentes organismos e instituciones debido a la falta de cobertura de la red eléctrica convencional. Este tipo de sistemas en donde el único generador es el FV han recibido el nombre de autosustentados (SFV-A). Ejemplos típicos de estos sistemas han sido implementados por PEMEX, Secretaría de Marina, Secretaría de Comunicaciones, SEP, Secretaría de Desarrollo Social, TELMEX, compañías televisivas, entre otras, que han tenido necesidad de elaborar proyectos de desarrollo social ó técnico, en sitios apartados de la red eléctrica convencional, para los cuales la tecnolo-

gía fotovoltaica ha sido la más apropiada. También, el uso de la tecnología FV en sistemas híbridos (SFV-H) aprovechando recursos energéticos como lo es el eólico y sistemas convencionales de motogeneración, se han estado fomentando para aquellos sitios aislados en donde la energía del viento puede aprovecharse, como a sido el caso de San Juanico en Baja California Sur. Si bien desde 1977 a la fecha se han instalado del orden de 20 MW¹¹, la carencia de especialistas, técnicos y promotores de tecnología con conocimiento, no ha permitido su difusión y uso masivo, aunque sean grandes las necesidades de electricidad en el medio rural.

Sin embargo, derivado de la situación internacional que está impulsando el uso masivo de la tecnología FV acoplada a la red (SFV-I) y la inquietud de muchos sectores nacionales, el 27 Junio de 2007, se aprueba y publica, en el Diario Oficial de la Federación, el modelo de contrato de interconexión a la red eléctrica nacional para sistemas FV's de baja potencia (máximo hasta 30.0 kW) bajo el esquema de medición neta¹². Este contrato permite que los usuarios del servicio eléctrico instalen su propio GFV, conectados directamente a la red y puedan reducir sus cuentas eléctricas usando un medidor bidireccional que contabiliza el suministro o consumo de la red convencional. La diferencia neta en un periodo dado entre lo suministrado y consumido es lo que el usuario debe pagar al servicio público, o viceversa.

Esto da una idea de que los GFV's constituyen una buena alternativa para que la facturación de consumo baje de manera drástica y se tenga una disminución de la energía provista por la red y un ahorro económico para el usuario.

Bajo este esquema puede esperarse un incremento en la demanda de GFV's interconectados a la red y a corto plazo, quizá para el 2013, si se consideran los diferentes estudios de mercado realizados¹³ se podría tener instalado del

¹¹ Y. Matsumoto, J. Agredano, A. Sánchez Juárez, and A. Urbano, Awakening PV in México; presentado en el 17th Photovoltaic Specialist Energy Conference. Trabajo 5P-P3-57, Fukuoka, Japan, 2007

¹² Resolución RES/176/2007 Comisión Reguladora de Energía, Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de Junio de 2007, Primera Sección.

¹³ Aarón Sánchez Juárez: Estudio de Mercado de las Fuentes de Energía Renovable en el Sector Agropecuario. "Electrificación de Agronegocios con Sistemas Fotovoltaicos. Preparado para la Asociación Nacional de Energía Solar por encargo del FIRCO-SAGARPA. Coordinó: Energía y Tecnología AC, 2008; Martin Amtmann GTZ-CONUEE-SENER:

orden de 50 MW-pico de tecnología FV adicionales a los que hay, sin considerar las acciones contempladas en el PSE.

No obstante la limitante del Modelo de Contrato para los SFV-I, se estima que dada la tendencia a la alza del precio de los hidrocarburos, el incremento gradual del CO₂ en la atmósfera, y la disminución en costos de la tecnología FV derivado de la producción masiva y la investigación, la demanda por parte de los industriales (la industria de servicios, manufactura, etc.) de SFV-I de mayor potencia será mayor en un periodo de tiempo corto (2014), en consecuencia, dichas aplicaciones tendrán que ser evaluadas, supervisadas y aprobados por la CRE a través de la CFE, la que para lograr su cometido de organismo regulador, tendrá que formar recursos humanos, con diferentes niveles de conocimiento, que les permita evaluar y supervisar, en todos los aspectos relacionados con la tecnología, desde el dimensionamiento, diseño, hasta la selección de equipos y materiales e instalación, de todos los proyectos que se presenten para su aprobación.

Ya que los sistemas FV's tienen potencial de aprovechamiento desde el medio rural, pasando por el urbano, hasta grandes plantas de generación en donde para éstas existe además el atractivo de remuneración por la venta de excedentes a la red y de bonos de carbono, hay un interés especial de negocios para lograr la expansión de estos mercados, considerando que el mayor crecimiento futuro de la demanda podría corresponder a los sistemas interconectados a la red, como ha sido el caso de los países europeos. De ahí la existencia de un mercado latente de millones de dólares en México que se podría detonar con políticas de fomento al uso extenso de esta tecnología, aun cuando todavía se carece de una industria fotovoltaica, pero que presenta altas posibilidades de desplegarla en el corto plazo, a través de alianzas empresariales.

“Nichos de mercado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica de México”; Editor A. Eckermann, S. Hack, V. Barzalobre; Junio 2009

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

La acción básica radica en dinamizar las políticas aún incipientes de la aplicación masiva de los sistemas fotovoltaicos en sus nichos de mayor beneficio, para lo cual es necesario, por un lado y al igual que en los casos de las otras tecnología solares, coordinar y potenciar los esfuerzos existentes y, por el otro, desarrollar el todavía incompleto esquema normativo en cuanto a los diseños y usos de estos sistemas. Para lograr esto, se debe señalar que el país cuenta con fortalezas en recursos humanos, que poseen conocimientos especializados suficientes para apoyar al sector público en estas definiciones, las que, para su actualización permanente, conviene enfocar la I&D+i a la obtención de celdas solares desarrolladas en México.

Con objeto de recuperar al menos alguna de las áreas de desarrollo en este campo de la energía solar fotovoltaica, se proponen los siguientes campos de I&D+i:

- Celdas solares de primera (silicio cristalino, policristalino), segunda (materiales en capa delgada) y tercera generación (Graetzel, nanoestructuradas y poliméricas), su escalamiento a prototipos y hasta su nivel industrial.
- Celdas solares para concentración solar (Tandem).
- Programas con metas bianuales en cuanto a eficiencia, costos e ingeniería por tipo de tecnología.
- Asociaciones entre empresas nacionales y extranjeras con el fin de establecer industrias en el ramo de módulos fotovoltaicos.
- Paquetes informáticos (software) para la modelación y el diseño de celdas solares y la corroboración de los modelos estructurados con datos experimentales obtenidos en los laboratorios nacionales.
- Paquetes informáticos el diseño de sistemas fotovoltaicos de mediana y gran potencia.

- Programas agresivos de capacitación a todos los niveles necesarios para que se garantice la implementación, adaptación y adopción de los sistemas FV's en los sectores sociales donde sean necesarios.



Energía solar térmica de baja entalpía

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

La energía solar térmica o energía termosolar consiste en el aprovechamiento de la radiación del Sol para producir calor. El medio para conseguir este aporte de temperatura es a través de colectores o captadores solares que consisten de una superficie que se expone a los rayos solares y absorbe la radiación para transformarla en calor que es transportado mediante un fluido. En función de la temperatura que puede alcanzar el área captadora, se han clasificado tres tipos de sistemas:

- De baja temperatura (BT): la captación es directa y la temperatura alcanzada por el fluido está por debajo del punto de ebullición del agua;
- De media temperatura (MT): captación de bajo índice de concentración, con temperatura del fluido superior a los 100°C;
- De alta temperatura (AT): captación de alto índice de concentración y temperatura por encima de 400°C.

En el caso particular de los sistemas de baja temperatura, este tipo de sistemas se aplica a requerimientos de baja entalpía, como son el calentamiento de agua para uso en viviendas, albercas, procesos industriales y el sector agropecuario; igualmente estos sistemas pueden ser utilizados para el acondicionamiento de aire (espacios), refrigeración, desalación y secado, pero se debe tener en cuenta que algunas de estas aplicaciones requieren una mayor entalpía que la proporcionada por los sistemas de baja temperatura. Cabe

señalar el caso particular de refrigeración donde se emplea comúnmente sistemas de concentración de mediana temperatura para lograr la disponibilidad termodinámica.

Dado que estos sistemas tienen una amplia experiencia en I&DT, como también una significativa trayectoria comercial, existen importantes avances en el desarrollo de esta tecnología en el mundo. Un caso a destacar es el de Grecia, donde es obligatoria la instalación de calentadores solares en el sector residencial -300 m² por cada 1000 habitantes-, que contrasta fuertemente con la situación en México, donde sólo se tienen 8 m²/1000 hab.

Situación en México

El país cuenta con una elevada irradiación solar promedio diario anual, del orden de 18 MJ/m², lo que ofrece un campo fértil para su amplio aprovechamiento. Esto fue entendido por algunos emprendedores, quienes iniciaron y promovieron la utilización de sistemas solares de baja temperatura en la década de los 1960s. En sus comienzos tuvieron un importante progreso, pero desafortunadamente se fue disipando progresivamente. Esto dio como resultado que se perdieran las capacidades hasta entonces desarrolladas, tanto en I&DT como aplicaciones industriales y comerciales. Al mismo tiempo, se fueron profundizando las carencias en aquellas áreas que apenas comenzaban su desarrollo. Actualmente, las insuficiencias en este campo son las siguientes:

- Carencias de bases de datos con mediciones fidedignas del potencial solar local;
- Definición incipientes de políticas para su aplicación masiva;
- Desarrollo incompleto de normatividad sobre los diseños y usos;
- Introducción mínima de las tecnologías disponibles en el mercado;
- Difusión y conocimiento escaso sobre la existencia de las tecnologías por parte de los empresarios y usuarios;
- Capacitación insuficiente del personal que instala estos sistemas;

- Comercialización de productos de mala calidad debido a que son copias casi artesanales de sistemas importados;
- Ofrecimiento de diseños obsoletos, provenientes muchos del extranjero, por empresas Pymes en su mayoría;
- Escasez de fabricantes nacionales de calentadores solares para su aplicación en albercas (No obstante que México es uno de los mercados más grandes del mundo donde se han instalado del orden de 840 mil colectores, de los cuales 70% ha sido en albercas);
- Importación de colectores de tubos evacuados y tubos de calor, tanto de vidrio-vidrio como de vidrio-metal, que presentan problemas técnicos;
- Ausencia de equipos solares para refrigeración y secado para aplicaciones industriales y comerciales.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

Como se señaló líneas arriba, los sistemas solares de BT tienen diversas aplicaciones de interés y utilidad en diversos sectores consumidores de energía; entre las más relevantes están el calentamiento, el enfriamiento y el secado. En cada caso es necesario identificar los diversos nichos de mercado, a partir de los cuales impulsar una campaña de fomento a la instalación masiva de equipos solares.

En el caso del calentamiento, su introducción en el sector residencial ofrece un importante potencial de ahorro del combustible tradicional (gas LP o gas natural). Se ha estimado que una buena instalación de un calentador solar puede ahorrar hasta el 50% del consumo de gas LP y un potencial equivalente de gas natural en los hogares.

En virtud de la creciente importación de estos dos combustibles, la introducción masiva de sistemas solares de baja temperatura, tanto en viviendas existentes y sobre todo en nuevas edificaciones, tendría un impacto muy positivo en las finanzas públicas y familiares, en adición a los importantes beneficios ambientales, pues cabe recordar que el uso de gas LP o gas natural

en el sector residencial, tanto para calentamiento de agua como para cocción, es muy ineficiente y resulta significativo en la emisión de gases de efecto invernadero.

Con estas bases, es muy factible definir metas de reducción de estos energéticos convencionales en un determinado plazo, como podría ser de 35% al 2015, lo que hace evidente la trascendencia de fortalecer las políticas públicas dirigidas a la instalación masiva de estos sistemas en el ámbito residencial (v.g. programa de hipotecas verdes del INFONAVIT y PROCALSOL de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía).

En el sector agropecuario y pesquero las tres aplicaciones que tienen un gran potencial para satisfacer una gran diversidad de requerimientos energéticos son: el calentamiento de ambientes de establecimientos pecuarios, avícolas y de crianza de peces; para secado de alimentos (granos en particular); para enfriamiento (conservación de alimentos, medicamentos y vacunas). Además en aplicaciones rurales se pueden introducir con éxito las estufas solares.

Todo lo anterior requerirá contar con un programa de desarrollo nacional para aplicaciones de energía solar de baja temperatura que favorezca el aprovechamiento de esta fuente energética y estimule el desarrollo de una industria nacional basada en la integración de cadenas productivas (desde la I&DT, pasando por la fabricación, hasta su comercialización masiva).

Con objeto de recuperar al menos alguna de las áreas de desarrollo en este campo de la energía solar de baja temperatura, se proponen los siguientes campos de I&DT:

- Evaluación del recurso solar (generación de bases de datos y mapas solares actualizados a nivel regional);
- Normas y reglamentos para la fabricación e instalación de las diversas tecnologías;
- Sistemas de automatización y control avanzados;
- Colectores solares de baja y media temperatura: canal parabólico, tubo evacuado, CPC;

- Desarrollo de nuevos materiales aplicados en la fabricación de captadores solares de baja temperatura con una buena relación costo-beneficio. Materiales nuevos y mejores como: superficies selectivas, películas antireflejantes, cubiertas transparentes, colectores poliméricos para colectores planos, de tubo evacuado y canal parabólico;
- Desarrollo de equipos de calentamiento solar para aplicaciones específicas;
- Metodologías de control y monitoreo para sistemas de calentamiento solar de gran capacidad;
- Sistemas solares para calentamiento, enfriamiento y secado, buscando las condiciones óptimas de operación (temperatura, velocidad, eficiencia, y propiedades de los medios a acondicionar (v.g. en el caso de secado de alimentos, sus características organolépticas) y los menores costos en cada aplicación;
- Diseños de configuraciones y prototipos adecuados a cada producto.
- Hibridación o sustitución de sistemas convencionales para calor de procesos industriales.

Actualmente en el país se cuenta con avances significativos en investigación que pueden dar pauta para la aplicación masiva de la tecnología solar de baja entalpía, por lo que una estrategia de coordinación y apoyo a estos grupos pondría al país en la senda de un desarrollo propio y dirigido a las necesidades nacionales.



Energía solar térmica de alta entalpía

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

La energía del sol puede ser usada directamente para calentar o iluminar. Estas son sus aplicaciones más difundidas, las cuales se caracterizan por procesos en los que no se requieren temperaturas demasiado elevadas. Sin embargo, mediante la utilización de concentradores solares, la radiación solar también tiene un enorme potencial para proveer energía a mediana y alta temperatura. Las tecnologías de mediana temperatura (entre 100 y 250°C), se caracterizan por razones de concentración bajas a moderadas (por debajo de 40) y pueden utilizarse para generar calor de proceso industrial, mientras que las de alta temperatura (por arriba de 250°C) requieren altas razones de concentración y se aplican en generación de potencia eléctrica y procesos termoquímicos solares.

El calor solar se puede utilizar para una gran variedad de procesos industriales que demandan energía térmica (generación de vapor, lavado, secado, destilación, pasteurización). El acoplamiento de los sistemas solares a procesos industriales puede hacerse en forma directa, por precalentamiento de agua o por generación de vapor, o de manera indirecta. Aquí se requieren colectores de baja y mediana concentración, como los concentradores parabólicos compuestos y los de canal parabólico. Tanto el desarrollo de colectores apropiados, como el acoplamiento de los sistemas de calentamiento solar a procesos industriales específicos son dos vertientes con importante margen para nuevos desarrollos: por un lado, los colectores tienen que ubicarse casi siempre en la instalación industrial, buscando superar las limitaciones de

espacio; de ahí la importancia de maximizar su eficiencia térmica y minimizar su peso (ya que instalarlos en los techos es una opción). También es necesario reducir costos en los diseños, pues estos sistemas tienen que competir todavía con combustibles relativamente baratos. El trabajo sobre el acoplamiento de colectores solares a procesos específicos es todavía incipiente, pues se cuenta sólo con algunos casos de estudio puntuales.

En la generación termosolar de potencia eléctrica, también denominada potencia solar concentrada (PSC), los concentradores se utilizan para calentar a altas temperaturas fluidos térmicos como aceites, aire y sales fundidas. Mediante un intercambiador de calor, la energía transportada por el fluido es usada para producir vapor de agua, con las características adecuadas para usarse en turbinas convencionales. El vapor también puede ser producido directamente en los colectores, como en el caso de la generación directa de vapor en sistemas de canal parabólico y torre central. Una vez producido el vapor, el funcionamiento es similar al de una central termoeléctrica convencional.

Dependiendo de su geometría, existen cuatro tecnologías de PSC: canal parabólico, concentrador lineal de Fresnel, torre central y plato parabólico. Los sistemas de canal parabólico enfocan la luz solar sobre receptores tubulares de alta eficiencia, por los cuales circula típicamente aceite térmico que se calienta a temperaturas de hasta 400°C. Con 9 plantas instaladas en California, es la más madura de las tecnologías de PSC, acumulando más de 100 años-planta de operación. Dichas plantas, conocidas como SEGS y que fueron instaladas a partir de inicios de la década de 1980, suman una capacidad total de 354 MWe y han funcionado de forma híbrida, utilizando gas natural como respaldo. Nuevas plantas se han comenzado a instalar recientemente, entre ellas Nevada Solar One, de 64 MWe, Andasol y Solnova en España, que proporcionarán juntas 250 MWe. Toda esta experiencia hace del canal parabólico una tecnología muy probada, lo que da certidumbre a las inversiones. En consecuencia, actualmente están por instalarse o planeadas decenas de nuevas plantas en Estados Unidos, España, Egipto, Argelia, Marruecos, Israel, Abu Dhabi y Jordania, con una capacidad total de de varios miles de MWe. Igualmente, se continúa la investigación para mejorar la eficiencia de los sistemas y reducir los costos de fabricación.

Los sistemas de Fresnel lineales son similares a los del canal parabólico en su rango de concentración y temperatura. Existen tres desarrollos de esta tecnología con proyectos piloto de pequeña escala: Kimberlina de AUSRA, que es la primera planta comercial en el mundo, con 5 MWe; PE-1, de NOVA-TEC BIOSOL y FRESDEMO de MAN/Solar Power Group. También existen tres plantas demostrativas para calor de proceso de la empresa MIRROXX. Se considera que la tecnología de Fresnel lineal tiene potencial de reducción de costos respecto de la de canal parabólico, pero todavía hace falta investigación y desarrollo para que al menos alcance los costos de la primera. Existen más de 200 MWe comerciales en propuesta en al menos dos plantas, en California y Jordania.

Los sistemas de torre central utilizan un gran campo de espejos planos, llamados heliostatos, típicamente con áreas de 100m² cada uno y que siguen al sol independientemente para enfocar la radiación solar en un receptor central montado en lo alto de una torre. Se alcanzan temperaturas en un rango entre 500 y 1500°C. En Estados Unidos se llevaron a cabo dos proyectos demostrativos en la primera mitad de la década de 1980, Solar One y Solar Two, con capacidad de 10.5 MWe. Recientemente (2006 y 2009) se echaron a andar en España las dos primeras plantas comerciales del mundo, la PS10 y la PS20, que funcionan con generación directa de vapor y tienen una capacidad conjunta de 31 MWe. Una tercera, la Gemasolar (antes denominada Solar Tres) de 17 MWe, se encuentra en construcción. En particular, esta última empleará un sistema de almacenamiento de sal fundida con duración de hasta 15 horas y respaldo en 15% con gas natural, esperando lograr en conjunto un factor de planta de hasta 70%. Por otro lado, paralelamente a esta tecnología ya bien conocida, se están desarrollando actualmente plantas experimentales con innovadoras tecnologías de heliostatos pequeños, de entre 1 y 8 m²: SEDC en Israel, eSolar en California, Solar Tower Jülich en Alemania y CSIRO en Australia.

Los sistemas de disco paraboloïdal consisten en un concentrador en forma de plato con un sistema de seguimiento en 2 ejes. En el foco se monta un motor Stirling que utiliza el calor directamente y se mueve con la estructura del plato. Esta tecnología es actualmente la de mejor desempeño entre todas las solares, con una eficiencia neta de conversión de la energía solar a eléc-

trica de 31%. Existen proyectos de investigación en Europa, Estados Unidos y Australia dirigidos a su aplicación en sistemas distribuidos de generación eléctrica. Por otro lado, la empresa Stirling Energy Systems, tiene planes de instalar un total de 1,600 MWe comerciales, consistentes en 64 mil unidades de 25 kWe cada una. Estos planes están respaldados por compromisos de compra de energía por parte de dos grandes empresas eléctricas en California.

Las plantas termosolares se pueden diseñar para generar electricidad despachable en todo momento, es decir, pueden operar de noche o en períodos de cielo nublado. Esto se logra almacenando parte del calor colectado o hibridando las plantas con el respaldo de un combustible fósil. En el primer caso se calientan materiales como concreto, sales fundidas, cerámicas o sustancias con cambio de fase. La investigación en esta área es muy importante, ya que el costo del almacenamiento es significativo en el costo total de la planta.

Otra aplicación de la radiación solar altamente concentrada, es en reacciones químicas para producción de combustibles como el hidrógeno u otros insumos de alto valor. En estos casos, el calor solar se usa para energizar reacciones químicas endotérmicas a altas temperaturas, procesos que son energéticamente muy caros con tecnologías convencionales. La producción de Hidrógeno mediante estas tecnologías es una muy prometedora opción de almacenamiento de energía solar, debido a que los procesos térmicos involucrados son mucho más eficientes energéticamente de que la electrólisis del agua. Sin embargo, todavía no hay ejemplos de uso industrial. El proyecto internacional SOLZINC, se enfocó a la reducción carbo-térmica del óxido de zinc. Dicho proyecto demostró en una instalación de torre central experimental de 0.3 MWt, en Israel, la reducción de ZnO_2 operando de manera continua, a temperaturas de alrededor de 1200°C , para producir 50 kg/hora de zinc reducido de 95% de pureza. El zinc así producido se puede utilizar en una celda de combustible aire/zinc para producir electricidad o en el proceso de hidrólisis para producir hidrógeno.

A nivel internacional existen dos importantes acuerdos de colaboración en I&D en energía solar, que funcionan bajo la cobertura de la Agencia Internacional de Energía: el acuerdo Solar PACES (Solar Power and Chemical Energy Systems) y el Programa de Calentamiento y Enfriamiento Solar (Solar Heating and Cooling Programme: SHCP). El primero está enfocado

en concentración y en química solar, mientras que el segundo en aplicaciones de baja temperatura, aunque algunas de sus actividades también involucran tópicos de concentración. Un aspecto interesante de estos proyectos es el intercambio permanente de información y la coordinación de esfuerzos entre grupos de investigación.

Situación en México

En México la aplicación de tecnologías solares térmicas en general es muy limitada, con excepción del calentamiento de agua para albercas y para uso sanitario, en las que existe una cantidad importante de instalaciones, aunque pocas si se comparan con el tamaño de la población.

En el campo de concentración ha habido investigación por más de 30 años en la UNAM, e instituciones como el IIE, el CINVESTAV, la UAM, el IPN, la UNISON, el CENIDET, la UABC, la UQROO y más recientemente en el INAOE. A pesar de que algunos de estos esfuerzos han sido de primer nivel, han carecido de coordinación y sus alcances han sido limitados. Entre los proyectos más importantes a nivel nacional, destaca el iniciado en 1981 por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con una planta de canal parabólico de 10 kWe, la cual sigue dando lugar a trabajo de investigación y formación de recursos humanos a la fecha. En 2007 el CONACYT aprobó el Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar, que involucra a varias instituciones bajo la dirección del Centro de Investigación en Energía de la UNAM. El objetivo del proyecto es desarrollar tres importantes infraestructuras de investigación en concentración solar: un horno solar de alto flujo radiativo, un campo de pruebas de helióstatos y una planta solar para el tratamiento fotocatalítico de aguas residuales. Finalmente, hay que mencionar el desarrollo de proyectos para calor solar de procesos industriales, que se han implementado en un par de empresas y en particular con tecnología de canal parabólico desarrollado en el IIE.

Cabe señalar que algunos grupos de investigación en el área de concentración tienen reconocimiento y colaboración internacional y están formando a investigadores jóvenes; sin embargo, todavía es reducida la comunidad de investigación sobre concentración y los nuevos recursos humanos están

teniendo dificultad para emplearse en instituciones de investigación de México, debido a la falta de plazas.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

A pesar de los avances logrados a la fecha en estas tecnologías todavía hay mucho por hacer en investigación básica y aplicada, así como en desarrollo tecnológico.

En el campo de PSC se requiere abatir los costos de generación, aún altos, que oscilan entre los 0.12 y 0.25 dólares/kWh. Se estima que es posible reducirlos los a 0.04 dólares/kWh en un lapso de 15 años. En el caso de aplicaciones industriales se espera alcanzar su rentabilidad en el plazo de una o dos décadas; la química solar de alta temperatura tiene potencial para el mediano y largo plazos.

En la energía solar de alta temperatura se requiere avanzar en diversas áreas a nivel de investigación y desarrollo tecnológico, que favorezcan una explotación amplia de estos sistemas en el país. De aquí la necesidad de actuar en distintas líneas como las que se enlistan a continuación:

Evaluación del recurso solar de radiación directa, mediante la instalación de una red nacional de monitoreo de radiación, estableciendo convenios de colaboración con las instituciones que actualmente cuentan con estaciones [Instituciones de educación superior (IES), CNA, SAGARPA, etc.] y agregando nuevas en las áreas no cubiertas.

Investigación y desarrollo en:

- Estudios básicos de procesos físicos y químicos en los sistemas de concentración solar para producción de electricidad y combustibles.
- Materiales y dispositivos mejorados para almacenamiento térmico.
- Materiales y procesos de fabricación mejorados para reflectores y absorbedores.

- Diseños, materiales y métodos de fabricación para el abaratamiento y aligeramiento de colectores.
- Receptores y procesos más eficientes (v. g., producción directa de vapor, receptores de aire).
- Integración de los procesos solares a la generación de potencia y procesos industriales.
- Materiales para reactores químicos solares.
- Diseños de reactores e instalaciones de concentración para química solar.

Así mismo, se proponen las siguientes acciones:

- La creación de más instituciones de I&DT e incremento sustancial de los puestos de trabajo.
- Asignación de recursos económicos a fondo perdido para la investigación, a fin de incrementar la penetración de estas tecnologías, que inicialmente no permiten la recuperación de las inversiones en el corto plazo.
- Financiamiento de un proyecto experimental-demostrativo de generación de potencia termosolar, con capacidad entre 1 y 2 MW e interconectada a la red, para fines de investigación y desarrollo.
- Instalación de al menos 1 planta de generación eléctrica termosolar por CFE en los próximos 5 años y aumentar a 3 en la década, con capacidades de al menos 50 MW cada una, involucrando a la comunidad académica sobre los aspectos tecnológicos de los proyectos.
- Identificación, caracterización y análisis termo-económico de procesos industriales susceptibles de acoplarse con colectores solares confiables y eficientes en rangos temperaturas entre 80-250°C.
- Fomento a la vinculación entre universidades e industria y sociedad para el establecimiento de proyectos de energía solar, en particular en los nichos de aplicación.

- Creación de una Plataforma Solar Mexicana para investigación en el noroeste del país, a través de un consorcio de IES en colaboración con CONACYT y SENER, con fondos federales.
- Fundación de un Instituto Nacional de Energía Solar conjuntamente entre CONACYT e IES.
- Establecimiento de una red de grupos de investigación en energía solar.

Conviene resaltar el hecho de que la concreción de todas estas propuestas tendrá un impacto muy positivo en la sociedad y el medio ambiente, hecho del que han estado concientes diversos países industrializados. Tal es el caso de las naciones europeas, que han estructurado acciones de largo alcance, como lo son los Programas Marco de Investigación de la Unión Europea, en particular el 5o y 6o, en los cuales se han invertido más de 25 millones de euros en investigación y desarrollo en tecnologías de concentración solar. El resultado más destacable de éstos ha sido el efecto multiplicador de los recursos asignados, dado que han generado del orden de 10 euros de inversión privada por cada euro aportado a los programas.

Bioenergía

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

La bioenergía es la energía que se obtiene de materiales orgánicos de origen biológico y ha sido utilizado como combustible a lo largo de toda la historia de la humanidad. La biomasa es el material orgánico de origen biológico más importante y es producida por las plantas al sintetizar luz, agua y CO_2 mediante el proceso de fotosíntesis, en el que la energía solar queda almacenada en enlaces químicos, que a su vez puede ser liberada en forma de biocombustibles mediante procesos como la combustión, la digestión, la descomposición o bien mediante su hidrólisis y fermentación. Otras fuentes de materiales orgánicos de origen biológico han sido los residuos de los animales particularmente el estiércol y los desechos de las sociedades humanas como la basura en su componente orgánica. En la actualidad, si bien los aprovechamientos tradicionales de la biomasa y los residuos mantienen su importancia como combustibles en comunidades rurales y urbanas principalmente de los países en desarrollo, gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y al empleo de procesos y métodos más eficientes todos los materiales orgánicos hoy por hoy se revelan como combustibles comerciales alternativos en sectores tan diversos como el residencial, comercial, de transporte e industrial, que producidos bajo criterios de sustentabilidad pueden ofrecer importantes cantidades de energía renovable con emisiones de cambio climático neutras.

Los materiales orgánicos de origen biológico proporcionan según su origen y procesamiento, energía técnicamente útil y factible de aprovechar desde el punto de vista económico en las tres formas físicas, a saber, sólido, líquido

y gaseoso; lo cual le confiere a la bioenergía las características de un recurso energético universal, limpio y de gran alcance si se aprovecha su capacidad de regeneración y se plantea su producción con criterios de sustentabilidad ambiental, energética, social, rural y económica. Debido a estas características la bioenergía puede contribuir de manera importante a sustituir las fuentes de energía fósil y nuclear. La bioenergía da lugar a los siguientes energéticos, los cuales se obtienen generalmente a través de diversos procesos de transformación del material biológico desarrollados ex profeso por el ser humano.

Biocombustibles, como la leña, residuos forestales, carbón vegetal, y desechos agrícolas como la paja, bagazo y otros. Estos energéticos tienen amplio uso en la cocción de alimentos, el calentamiento de agua, la producción de electricidad en turbinas de vapor y la producción de calor industrial y electricidad. Además, se puede obtener de ellos gas de pirólisis que se usa como energético en motores de combustión interna.

Biocarburantes, como los aceites vegetales puros, los residuos de aceite de cocina, los aceites vegetales esterificados (biodiesel), el alcohol (etanol carburante), los cuales se emplean en motores Otto y Diesel para poner en marcha automóviles, autobuses, camiones de carga, o para producir electricidad y calor en generadores y trabajo mecánico proveniente de su uso en motores industriales. Estos energéticos líquidos actualmente provienen a nivel mundial de una amplia variedad de cultivos como son la caña de azúcar, el maíz, el betabel, colza, la soja y la palma de aceite, entre otros, pero en un futuro corto provendrán de otros cultivos como la higuera, la Jatropha así como de los residuos de aceite de cocina y residuos agroindustriales, de material lignocelulósico provenientes de plantaciones energéticas forestales y de cultivos de microalgas.

Biogás, que es el metano, producto de la fermentación de residuos orgánicos de los bosques, campos agrícolas y de los desechos de animales de crianza como vacas, cerdos, borregos, cabras, caballos y aves. Asimismo, este producto energético se puede obtener de la basura a través de su producción en rellenos sanitarios. El metano cuando es extraído se emplea entonces para producir ya sea energía térmica, mecánica o eléctrica. Por otro lado, el hidrógeno, combustible gaseoso, también puede ser obtenido transformando residuos orgánicos o bien mediante procesos fotobiológicos.

El uso de la bioenergía tiene importantes ventajas que la hacen sumamente atractiva para ser usada como energético. En la problemática de cambio climático su gran ventaja frente a los combustibles fósiles es que puede sustituirlos reduciendo cantidades muy importantes de emisiones que producen el cambio climático. Otra ventaja es que es la única fuente energética capaz de retar al petróleo en su máspreciado mercado capturado, a saber, el de los combustibles líquidos para el sector transporte, como se está evidenciando en Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea en donde el etanol carburante y el biodiesel están quitándole partes importantes de mercado a las gasolinas y al diesel.

Hay que remarcar también que la bioenergía es la única fuente de energía renovable que se puede almacenar tan fácilmente como el petróleo y el gas lo cual es una ventaja económica en el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía, particularmente en el sector transporte. En el sector eléctrico, esta misma cualidad hace que la bioenergía para la producción de electricidad sea completamente despachable, ya que las plantas de bioenergía constituyen capacidades “firmes” de potencia eléctrica.

También, es importante mencionar que la bioenergía sustentable fomenta la propagación de plantas y árboles, ofrecen nuevas oportunidades a la agricultura, permiten un mejor equilibrio entre el desarrollo urbano y rural y propicia un mejor manejo de los espacios, de los bosques, de las reservas naturales, de los asentamientos humanos y de las actividades productivas. Permite igualmente la eliminación de los desechos orgánicos rurales y urbanos por lo que contribuye a la higiene y al desarrollo de materiales y sustancias de origen orgánico para la industria de la construcción y del papel.

Adicionalmente, la producción sostenible de la biomasa brinda numerosos servicios ambientales de tipo local y regional tales como el control de la erosión del suelo, la regulación del ciclo hidrológico y la protección de las áreas de hábitat de fauna silvestre. Si las plantaciones energéticas se establecen en tierras degradadas, es posible rehabilitarlas, mejorando la calidad y fertilidad del suelo. Desde el punto de vista social y económico la bioenergía tiene un potencial amplio para el desarrollo de pequeñas y medianas industrias que pueden representar cientos de miles de empleos.

Es importante remarcar que el logro de la bioenergía debe de realizarse alejándose de los sistemas de producción agrícola intensiva, a gran escala y basados en monocultivos ya que con frecuencia ellos llevan al desgaste en la calidad del suelo, la deforestación y a la pérdida de biodiversidad.

Situación en México

El potencial de la bioenergía en México se estima entre 3,035 PJ/año y 4,550 PJ/año lo que representa el 54-80% de la oferta interna bruta de la energía primaria consumida en México en el 2002. Destacan especialmente el potencial energético de la biomasa proveniente del manejo y explotación de los bosques naturales, de las plantaciones forestales, de los subproductos agrícolas y de los cultivos energéticos. Pese a este importante potencial, en el país solamente se explota la bioenergía en su versión más tradicional, esto es usando la leña como combustible residencial y de pequeñas industrias, así como en el bagazo de caña en ingenios. Recientemente el país apenas ha iniciado la explotación de lo que se denomina la primera generación de biocombustibles a raíz de la entrada en vigor el 1 de enero de 2008 de la Ley de promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Cabe aclarar que aunque se tenga un enorme potencial de bioenergía, no se debe planear que esta opción energética sustituya toda o la mayor parte de la energía obtenida de los combustibles fósiles. La bioenergía debe constituirse en complemento del abanico que representan las energías renovables. A diferencia de la energía eléctrica que se obtiene como producto con la mayoría de las fuentes de energía renovable, corresponde a la bioenergía aprovechar las características de transformación de la biomasa para la obtención de combustibles sólidos, gaseosos, pero sobre todo líquidos para insertarse en sectores como el del transporte.

En el taller auspiciado por la Academia Mexicana de Ciencias se determinó que el desarrollo de la bioenergía en México tiene algunas fortalezas. Entre estas se encuentran las siguientes: existen estudios sobre la disponibilidad de los recursos biomásicos que se pueden aprovechar para generar biocombustibles sin afectar la generación de alimentos. También se cuenta con varios laboratorios universitarios de investigación, aún pequeñas empresas, que se están dedicando a tratar de desarrollar e implementar tecnologías

sustentables para la producción de biomasa y tecnologías de transformación para obtener biocombustibles. Además ya existe una Ley sobre Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos, aunado a que a inicios de este año se publicó su reglamento. Sobre todo en el campo del biodiesel existe una efervescencia y gran esfuerzo para tener algunos desarrollos tecnológicos mexicanos a nivel agronómico y de transformación de aceites. Aunado a esto y aparte de todas las ventajas ambientales y sociales en la producción de biocombustibles, la situación geográfica y el clima del país, así como el inicio de la declinación de la producción y de las reservas petroleras nacionales y los precios de petróleo relativamente alto, propician un ambiente favorable para el desarrollo de biocombustibles en México. Las oportunidades que se detectaron para esto son el potencial que existe en el país de grandes recursos bioenergéticos, los cuales a diferencia de los combustibles fósiles, se encuentran distribuidos ampliamente en el territorio nacional, por mencionar algunos: la caña de azúcar en el centro del país; bosques altamente productivos, que con un correcto manejo constituyen un potencial elevado para la generación de bioenergía; la *Jatropha* y otros cultivos en el sureste, sorgo dulce en el bajío y norte, y aún agaves y otros recursos dendroenergéticos en regiones semiáridas de una amplia parte de varios estados, así como un potencial, aún sin determinar, para la propagación y cultivo de microalgas oleaginosas en prácticamente todas las costas del país. También existen varios grupos de investigación, aunque con poco tiempo de trabajar en esta área, que ya están establecidos en lugares como Baja California, Sonora, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa, Guadalajara, Chiapas, Veracruz, Querétaro, Guanajuato, la Ciudad de México, Morelos y Yucatán, entre otros, que están desarrollando investigación aplicada para la obtención de bioenergía. Un aspecto importante que se detectó es que es posible y se tiene la capacidad de planear y programar la transición energética en el ámbito de competencia de la bioenergía.

Por otro lado, también se detectó que existen debilidades y amenazas para un mayor desarrollo de la bioenergía. Entre estas se encuentran: un marco normativo insuficiente y concentrado en biocombustibles líquidos; pocos grupos dedicados de forma integral a la I&D tecnológico en el área; falta de una política energética integral que contemple a la bioenergía; la masa crítica de recursos humanos en el área es incipiente; existen apoyos escasos en entidades

públicas; la toma de decisiones y la velocidad de acción han sido muy lentas; existe una falta de visión a largo plazo; los subsidios a los combustibles derivados de hidrocarburos limita el margen de acción de los biocombustibles; y existe una falta de visión integral, esto es la necesidad de integrar proyectos nacional que abarque aspectos agrícolas, de manejo de bosques, transformación de materiales en bioenergía y biocombustibles, evaluación de impactos ambientales, rurales y sociales, y aspectos de distribución y mercadeo.

En el taller se detectó que es necesario e indispensable generar un plan nacional de desarrollo de energías renovables, incluyendo la bioenergía, con fundamentos claros de sustentabilidad. En el caso de la bioenergía y por sus características, este plan debe contemplar un desarrollo conjunto entre todos los sectores de la sociedad: centros de investigación, universidades, empresarios; políticos y personas dedicadas a la agricultura y agronomía, entre otras. También, por el abanico de sectores que abarcan la bioenergía y los biocombustibles, esto es desde el campesino, pasando por el industrial, distribución y comercialización, el de normas y estándares, hasta llegar al usuario final, así como la necesidad de modelar y predecir los impactos sociales, económicos, rurales y ambientales que puede tener el uso intensivo de la bioenergía y biocombustibles, es necesario formar redes de investigación con los objetivos de obtener apoyos económicos nacionales e internacionales y generar tecnología en todas las áreas que competen a la cadena de producción de biocombustibles, el desarrollo de conocimiento científico y generación de recursos humanos en todos los niveles, para crear tecnologías de primera, segunda y tercera generación, que sean transferibles al sector productivo a corto, mediano y largo plazo en el contexto de la naturaleza del país.

Necesidades de investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la bioenergía para México

Se detectaron tres líneas eje como perspectivas tecnológicas que deben abordarse de forma integral, en el siguiente cuadro se sintetiza este análisis.

LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3
Evaluar el potencial de recursos biomásicos y su manejo sostenible	Adaptar y desarrollar tecnologías de transformación de biomasas no alimentarias para energía, vía pirólisis, gasificación, co-combustión, biorefinación y síntesis.	Modelar la transición energética para evaluar sus efectos macroeconómicos, sociales, y ambientales
Construir un marco general de evaluación, definir los indicadores y obtener valores reales de: existencia de recursos, productividad, diseño y métodos de manejo.	Realizar experimentación adaptativa y demostración de tecnologías maduras: co-combustión de biomasa, gasificación, fermentación para etanol, biodiesel, biogás, usos rurales, carbón vegetal.	Realizar un programa nacional de fomento a la Bioenergía con una red de expertos y tomadores de decisión.
Definir un grupo de trabajo que coordine y conjunte las actividades e informaciones	Reforzar laboratorios existentes dedicados a tecnologías de 2ª generación en bioenergía con fines de innovación, para obtener productos como etanol a partir de lignocelulosa, butanol y biodiesel a partir de microalgas	Desarrollar un sistema de información nacional con datos reales sectoriales de los procesos, tecnologías y consumos energéticos, que permitan definir el uso final de la energía en México.
Desarrollar las tecnologías, técnicas y métodos para el manejo sustentable y las plantaciones y cultivos energéticos.	Crear instancias de especialización (postgrado) en Bioenergía y energías renovables.	Integrar modelos macro y de uso final de la energía para evaluar los aspectos económicos, sociales, energéticos y de impacto ambiental Desarrollar modelos para la evaluación de la sustentabilidad.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

La bioenergía requiere completar con más precisión el recurso potencial y real del país. Igualmente, requiere reforzar los recursos humanos existentes y las líneas de I&DT relacionadas con el estudio de la sostenibilidad de los bio-combustibles y las consideraciones sociales y ambientales de los proyectos.

De manera más detallada, se hace necesario desarrollar:

- Las tecnologías de segunda generación para producción de etanol con materiales lignocelulósicos.
- La ingeniería metabólica de microorganismos para aprovechar todos los componentes de la lignocelulosa.
- Las tecnologías de las plantaciones energéticas forestales y sistemas agroforestales.
- Las tecnologías para el aprovechamiento de la madera a través de los procesos de hidrólisis termo-química y enzimática.
- La producción de biogás a partir de vinazas con un manejo sostenible.
- Las tecnologías de segunda generación para síntesis de HCs a partir de biomasa (vía gasificación y síntesis Fischer-Tropsch).
- La biotecnología de primera generación para la síntesis de butanol, alcanos, alquenos y compuestos aromáticos.
- Los sistemas de segunda generación para generación de calor en aplicaciones rurales y de pequeña escala.
- Los modelos de la producción de biomasa y otros servicios ambientales a partir del manejo ecológico de bosques y selvas.
- La gasificación de biomasa para generación de calor y potencia en plantas termoeléctricas existentes.
- La tecnología para generación de hidrógeno a partir de carbón vegetal.

- Los modelos de explotación de insumos agrícolas para la fabricación de biocombustibles, en condiciones sociales y ambientales de respecto a las comunidades y regiones donde se produzcan.
- Las tecnologías de producción de biogás de granjas agropecuarias y aguas residuales.
- La producción de biodiesel a partir de plantas oleaginosas no comestibles, así como de lípidos provenientes de cultivos de algas y cianobacterias oleaginosas.
- Los sistemas de producción de biomasa a partir de algas factibles de descomposición térmica (craker), para obtener productos orgánicos (como los provenientes del petróleo).
- Las tecnologías para la producción de biofertilizantes.
- Los modelos de optimización y mejoramiento del cultivo de caña de azúcar.
- Los modelos para la simulación biofísica computarizada de cultivos y plantaciones energéticas.
- Los modelos de evaluación energética, económica y ambiental de cultivos y plantaciones.
- Los modelos para crear escenarios de bioenergía viables y sustentables.



Energía eólica

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia las adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión. Los vientos son generados por el calentamiento no uniforme de la superficie terrestre proveniente de la radiación solar; sólo entre el 1 y 2% de esta energía incidente se convierte en viento.

Esta energía ha sido aprovechada desde la antigüedad para impulsar barcos a velas o para hacer funcionar molinos al mover aspas conectadas a su maquinaria. Actualmente, la energía del viento se aprovecha en máquinas eólicas (aerobombas, aeromotores y aerogeneradores), capaces de transformar la energía cinética en mecánica de rotación, ya sea para accionar directamente máquinas de tracción o para la producción de electricidad. En este último caso, el sistema de conversión (que comprende un generador eléctrico, normalmente un alternador, con sus sistemas de control y de conexión a la red) es conocido como aerogenerador.

Para mejorar la rentabilidad de estos sistemas, en parte asociada al carácter discontinuo del recurso eólico, y para obtener mayor potencia, suelen instalarse en grupos denominados parques eólicos. Estos pueden instalarse en espacios no aptos para otros fines, como son zonas desérticas o próximas a la costa, en laderas áridas y muy empinadas para ser cultivables; también pueden convivir con otros usos del suelo, como prados ganaderos o áreas de cultivos bajos.

Se puede decir que en la década de 1980 nace la industria eolieléctrica, cuando las primeras turbinas eólicas o aerogeneradores comerciales se ubicaron en Palm Springs, California en Estados Unidos (USA). Al comparar aquellas primeras instalaciones con las actuales, la capacidad, la eficacia e impacto visual han mejorado enormemente. El avance más dramático se ubica en el aumento de la capacidad de generación eléctrica y en el incremento en la eficiencia de conversión de la energía eólica por turbina. Los primeros aerogeneradores presentaban potencias de apenas 25 kilo-watts (kW) hace 25 años y en el presente la gama comercial típica es a partir de 750 hasta 3,000 kW (3.0 MW). Así, cada turbina de 3 MW produce más energía eléctrica que 250 máquinas que se comercializaban a finales de la década de 1980.

El auge en la fabricación de estos nuevos aerogeneradores tiene su base principalmente en mayores conocimientos en aerodinámica, mecánica y eléctrica, así como en los beneficios económicos de las técnicas de su producción en masa, sin olvidar desde luego los recursos económicos en ciencia y tecnología (C&T) que ha permitido reducir sustancialmente los costos de generación de energía eléctrica a partir de esta tecnología.

Las principales ventajas que ofrece la generación eolieléctrica moderna son:

- Presenta un bajo costo nivelado de producción de electricidad, que resulta competitivo con la generada a partir de energía nuclear, carbón e inclusive en algunos casos del ciclo combinado, cuando el precio del gas natural es alto.
- Está libre de los costos de combustible, dado que emplea un recurso natural inagotable.
- Genera energía limpia con bajo impacto ambiental, particularmente porque no presentan emisiones de bióxido de carbono durante su operación (aunque sí en ciertos segmentos de su ciclo de vida).
- Proporciona cierto resguardo contra volatilidad del precio de los combustibles fósiles.

- Mejora la independencia energética y tecnológica, ya que evita la importación de combustibles.
- Es modular y rápida de instalar, y cuenta con una vida útil de 25 años.
- Es compatible su implantación con otras fuentes convencionales y alternas, para la instalación de sistemas híbridos.

Es importante mencionar que, la generación eoloelectrónica presenta bajo impacto en el uso del suelo, en los casos de emplear un solo equipo, dado que la cimentación de un aerogenerador de 1 MW no llega a requerir más allá de 150 metros cuadrados, lo que permite actividades agropecuarias en sus inmediaciones. Un aerogenerador de 1 MW puede producir electricidad para abastecer alrededor de 1,500 con una demanda promedio similar a la que ocurre en México, del orden de 150 kwh/mes. Además, los aerogeneradores modernos son modulares y rápidos de instalar; el proceso de construcción para una planta de 100 MW puede tomar menos de un año, lo que es relevante para economías con necesidad de un aumento rápido en la producción eléctrica.

Otro factor favorable es que, por ahora, la conexión de aerogeneradores a la red eléctrica ha causado relativamente pocos problemas cuando se trata de sistemas robustos, como son los casos de Estados Unidos y la Unión Europea; en esta última región, Dinamarca se distingue como uno de los países con más éxito en la aplicación de esta tecnología, donde ahora produce cerca de 16% del consumo nacional de electricidad.

No obstante que la energía eólica es la de mayor avance entre las ER's, también enfrenta retos asociados a factores técnicos (interconexión a la red eléctrica por su intermitencia), ambientales (daño a aves migratorias, ruido, competencia por el uso del suelo) y estéticas; no obstante, sigue siendo una de las opciones renovables con mayor futuro.

A finales del 2008 la capacidad mundial instalada era de 121,188 MW, entre los países que más destacan encontramos a Estados Unidos cuya capacidad instalada representó el 21% (25,170 MW), Alemania el 20% (23,903 MW), España el 14% (16,740 MW) y China el 10% (12,210 MW).

A la fecha, la mayoría de los desarrollos eólicos se han ubicado en tierra firme, pero debido a la escasez de espacio o a las restricciones en el cambio de

uso del suelo, se ha buscado un mejor régimen del viento, por lo que hay auge importante de las instalaciones mar adentro, típicamente a 10 kilómetros o más de tierra firme. Estos aerogeneradores son de tamaño más grande que los empleados en tierra y presentan mayor rendimiento, por el menor factor de rugosidad del agua (especialmente mar adentro) y la mayor velocidad media del viento, como ya se dijo, que se traduce en factores de planta considerablemente más altos. Se entiende por rugosidad del terreno los obstáculos que encuentra el viento a nivel del suelo, así un terreno nevado o árido resulta menos rugoso que un campo de trigo o un pastizal. Como al incrementarse la rugosidad disminuye la velocidad del viento, es recomendable instalar los aerogeneradores en zonas de baja rugosidad.

En la mayoría de los casos, los desarrollos mar adentro son más costosos que los terrestres, pero esto depende de las cualidades de cada sitio; ello se debe a que las torres son más altas que las terrestres, dado que incluye el tramo sumergido, las cimentaciones son más difíciles de construir y la transmisión de la energía generada requiere de cables submarinos, no sólo más caros de instalar, sino por su requerimiento de protección anticorrosión, además de los equipos y la maquinaria de antifatiga.

Algunos países como Canadá, Italia, Finlandia, China, Taiwán, Noruega, España, Francia y EU han empezado el desarrollo de centrales eólicas mar adentro, por lo que es de esperar que entre el año 2012 y 2017 se cuente con capacidad instalada mundial alrededor de 10 GW contra los apenas 1.11 GW actuales.

A futuro, tres diversos panoramas se consideran para el crecimiento de la industria eólica alrededor del mundo. El más conservador, denominado de “referencia”, se basa en las proyecciones realizadas en el 2007 por la Agencia Internacional de Energía (AIE), inicialmente hasta el 2030, ampliado posteriormente al 2050¹⁴. En el escenario “moderado” se considera todas aquellas medidas y políticas para apoyar a las energías renovables (ER) que están actualmente en curso o en planeación en el planeta. También supone que los objetivos fijados por muchos países para el desarrollo de la energía eólica se están llevando a cabo con éxito. El panorama más ambicioso es el “avanzado”, que sigue una trayectoria similar a la propuesta en la serie de informes

¹⁴ Con base en el estudio del Centro Aeroespacial de Alemania (DLR por sus siglas en alemán).

Fuerza Eólica 10 y 12, que se realizaron desde 1999 por la Asociación Europea de la Energía Eólica (EWEA por sus siglas en inglés), el Consejo Global de la Energía del Viento (GWEC por sus siglas en inglés) y Greenpeace. En dichos reportes se examina la factibilidad de proveer entre 10% y 12% de la electricidad del mundo por esta fuente. En este escenario se considera además un importante avance tecnológico, con base en las expectativas de I&D de la industria eoloeléctrica.

Los resultados de los escenarios globales de la energía eólica demuestran que, incluso bajo un escenario conservador, como muestra la IEA, esta fuente podría proveer 5% de la electricidad del mundo antes del 2030 y 6.6% antes del 2050. Se asume que se ha introducido la proyección de un “alto rendimiento energético”, a través del uso eficiente de la energía eléctrica y mejoras técnicas en las partes del aerogenerador.

Bajo la proyección “moderada” del crecimiento de la eólica se considera también un ahorro energético ambicioso, así que la energía del viento podría proveer el 15.6% de la electricidad del mundo antes de 2030 y 17.7% antes de 2050.

En el escenario “avanzado” del desarrollo de la energía del viento, se considerando igualmente un ahorro muy ambicioso y una muy alta eficiencia de la electricidad, estimándose entonces que la eólica podría proveer 29.1% de la demanda eléctrica del mundo antes de 2030 y 34.2% antes de 2050.

En el nivel de penetración denominado “avanzado” se requiere que la producción eléctrica vía eólica cuente con respaldo, almacenamiento o bien se utilice igualmente en la obtención de otras ER, como en la producción de hidrógeno como combustible para cualquiera de sus aplicaciones: transporte, generación eléctrica, otros. Estos resultados muestran que la eólica puede hacer una contribución importante a la satisfacción de la necesidad global de energía limpia y renovable en el plazo de los próximos 30 años, por lo que es recomendable incrementar su rendimiento energético para mejorar su participación a la matriz de energía global. No obstante lo anterior, hasta el 2010, las estimaciones para la capacidad instalada eólica resultan más expectativas que predicciones factibles; esto es porque los datos disponibles de esta industria muestran el crecimiento previsto de los mercados mundiales sólo para los 5

años próximos y más allá de este plazo el patrón de desarrollo es mucho más difícil de vaticinar.

Situación en México

En el país ya han iniciado las aplicaciones comerciales de la generación eolieléctrica, particularmente en la modalidad de centrales interconectadas a red. Actualmente se cuenta con 163.3 MW instalados, La Venta II con 83.3 y Parques Ecológicos de México con 80 MW MW, ambos en Oaxaca) y la Asociación Mexicana de Energía Eólica proyecta que podría haber por lo menos 3,000 MW para el 2014, la gran mayoría a ubicarse en el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

La energía eólica es una de las ER con mayor avance en el país; no obstante, requiere de mayor impulso, a fin de consolidar e impulsar su crecimiento más dinámico. Lo anterior se basa en el abundante recurso eólico, en el importante grupo de profesionistas en áreas de investigación, desarrollo e industria, experiencia en instalación y operación de centrales de este tipo, pero igualmente se considera la falta de una industria nacional en este campo y en el hecho de que los esfuerzos desplegados han sido aislados y dispersos. De lo anterior se tiene que, las áreas específicas a promover son las siguientes.

Para alcanzar metas más ambiciosas en la participación de la energía eólica en el país se hacen necesarias las siguientes acciones:

- Evaluar el recurso eólico que se estima es abundante en el país, superior al de varias naciones ahora líderes en generación eolieléctrica (v.g. Alemania, España).
- Desarrollar, adaptar y homologar metodologías disponibles para la generación y gestión de la información anemométrica y la necesaria para el aprovechamiento eólico, como los relativos a los sistemas y centrales eólicas.

- Estructurar una base de datos del recurso eólico de alta confiabilidad (variables atmosféricas de micro y macro escala), con objetivo de planificar, modelar y hacer la estimación técnico-económica con bases realistas, así como para dar seguridad y atraer las inversiones necesarias.
- Desarrollar modelos prospectivos de la variabilidad del recurso, a diferentes plazos (corto: días-semanas y largo: semanas-meses) y con alta certidumbre, así como para instalaciones en terrenos complejos.
- Fomentar la capacidad industrial potencial, a fin de fabricar aerogeneradores, sus subsistemas y varios de sus componentes en el país, con la consecuente creación de empleos.
- Coordinar bajo objetivos específicos y comunes, los recursos humanos abocados a las diversas especialidades de esta fuente, tanto en investigación y desarrollo tecnológico, como los industriales.
- Promover el desarrollo tecnológico nacional de aerogeneradores, incluyendo sus subsistemas aerodinámico, mecánico, eléctrico y de control (v.g. generadores multipolos, motores síncronos y asíncronos, etc.).
- Aprovechar el interés de inversionistas e industriales en conformar una industria eoloeléctrica propia, lo que además se conjuga con la tendencia a la escasez de aerogeneradores en el ámbito internacional, en los próximos 10-15 años.
- Establecer alianzas con instituciones extranjeras de I&D con fortalezas en energía eólica
- Iniciar con las aplicaciones más sencillas y lucrativas para los inversionistas públicos y privados, avanzando de los sitios con condiciones de viento más favorables a las de mayor complejidad, como una acción estratégica que evite la dependencia tecnológica en este campo a mediano y largo plazos.
- Desarrollar todas las actividades requeridas para la instalación de sistemas híbridos: eólica y otra fuente.

- Beneficiarse de la experiencia internacional, mediante convenios que establezcan como requisito la transferencia de tecnología.
- Desarrollar aerogeneradores de diversas capacidades (micro W, mini kW y macro MW) y que sean adecuados a las condiciones del territorio nacional.

Energía geotérmica

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

Todos los procesos geodinámicos que suceden en la Tierra son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior. La energía geotérmica es referida como el calor natural que se encuentra almacenado en el interior de la Tierra. Esta energía térmica puede ser transportada hacia la superficie a través de la roca mediante la extracción o inyección de fluidos, dependiendo del tipo de sistema geotérmico a explotar. Estos fluidos al interactuar con la roca caliente adquieren condiciones de presión y temperatura elevadas, lo que finalmente favorece la producción de grandes cantidades de agua muy caliente o vapor. El contenido energético del fluido geotérmico depende de muchos factores, pero principalmente del intercambio de calor con la roca circundante, la cual es continuamente calentada por la fuente primaria de calor (o también conocida como cámara magmática) que existe en la parte más profunda del sistema geotérmico¹⁵.

El flujo de calor total que fluye constantemente del interior de la Tierra hacia la superficie se estima en ~42 Tera-Watts (TW), del cual, 19% proviene de la corteza, 76% de manto y 5% del núcleo¹⁶. La mayor contribución de energía procede de la desintegración de isótopos radiactivos de vida larga (235U, 238U, 232Th y 40K) presentes en el manto, los cuales al decaer gene-

¹⁵ Torres, V., Arellano, V., Barragán, R.M., González, E., Herrera, J.J., Santoyo, E., Venegas S. (1993) Geotermia en México. Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica - UNAM, México, ISBN-968-36-3444-3, 161 p.

¹⁶ Gupta, H.K., Roy, S. (2007) Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 199-229.

ran continuamente una inmensa cantidad de calor. La conductividad térmica de las rocas (o capacidad de conducción de calor), al ser muy baja, hace que el flujo de calor terrestre perdure cientos de millones de años para agotar completamente este recurso endógeno. Las propiedades renovables del flujo de calor y los largos tiempos geológicos requeridos para su agotamiento, hacen que la geotermia sea considerada como una fuente de energía y casi inagotable, si se explota en forma sostenible.

Los sistemas geotérmicos se clasifican, en forma general, con base en la temperatura del fluido endógeno o cantidad de energía disponible para intercambio (técnicamente conocida como entalpía). Cuando la temperatura del sistema geotérmico es $>200^{\circ}\text{C}$ se considera un recurso de alta entalpía, ideal para la generación de electricidad mediante sistemas convencionales de turbogeneración. Contrariamente, si las temperaturas del sistema están en el intervalo de 100°C a 200°C ó $<100^{\circ}\text{C}$, se les denomina sistema de mediana o baja entalpía, respectivamente.

A la fecha se han realizado numerosos trabajos de I+D orientados al desarrollo de métodos para la exploración y explotación de los sistemas geotérmicos. Como resultado de estas investigaciones, tecnologías muy maduras han sido exitosamente desarrolladas para explorar y explotar los sistemas geotérmicos existentes en la Tierra.

Entre estos sistemas destacan los Sistemas Hidrotermales Convectivos, los cuales están formados por: una fuente primaria de calor, fluidos monofásicos o bifásicos (confinados en reservorios de vapor o líquido dominante) y una capa de roca impermeable. Los fluidos de estos sistemas hidrotermales tienen su origen generalmente en la superficie de la Tierra en forma de lluvia (agua meteórica), aunque también podría tener un origen marino o magmático. Estos fluidos se infiltran en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas penetrando a varios kilómetros de profundidad, en donde son calentados por la roca para alcanzar temperaturas promedio de $\sim 300^{\circ}\text{C}$. Existen también otros tipos de sistemas geotérmicos disponibles en la Tierra los cuales cuentan con un gran potencial energético susceptible de explotarse en el futuro, y entre los cuales destacan **Los Sistemas Geotérmicos Mejorados** (EGS, por su acrónimo en inglés), también conocidos como Sistemas de Roca Seca Caliente, los cuales han sido recientemente definidos como sistemas geotérmicos de

nueva generación con una disponibilidad de energía prácticamente ilimitada e inagotable ya que están distribuidos en casi toda la Tierra.

Los EGS no cuentan con reservorios de fluido almacenado, sin embargo presentan temperaturas muy atractivas en la roca (hasta $\sim 650^{\circ}\text{C}$) para la generación de electricidad y usos directos. El aprovechamiento de los EGS requiere de la creación de una red de fracturas en la formación geológica y la inyección de fluidos para la recuperación del calor disponible y su transporte hacia la superficie¹⁷. Por su inmenso potencial y su distribución prácticamente uniforme en toda la superficie terrestre, se estima que para el 2050 podrían instalarse alrededor de $\sim 100,000$ MWe ($1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$)¹⁸. Esta promisorio tecnología se encuentra ya en fase de I+D con avances muy importantes, destacándose el proyecto demostrativo de Soultz-sous-Forêts en Francia con una planta piloto de 1.5 MWe. No obstante, que su desarrollo ha sido lento y que aún no se disponen completamente las nuevas tecnologías para su extracción, se prevé que la explotación de estos sistemas representará en el futuro una contribución muy importante en el portafolio de energías renovables de muchos países.

Los Sistemas Geotérmicos Supercríticos (SGS), los cuales se caracterizan por tener fluidos muy profundos en estado termodinámico supercrítico con temperaturas de hasta 600°C . Las condiciones supercríticas se logran cuando los fluidos se someten a presiones y temperaturas muy elevadas, por encima de la temperatura y presión de ebullición, en donde el fluido suele comportarse como una mezcla de líquido y gas con propiedades intermedias. Los fluidos supercríticos tienen la particularidad de poder almacenar una gran cantidad de energía, lo cual en principio, permitiría obtener 10 veces más de energía térmica que cualquier fluido extraído de un sistema geotérmico convencional.

Proyectos de exploración y de pre-factibilidad de estos sistemas han sido ya iniciados en Islandia, en donde se realiza la perforación de un pozo de ~ 5 km de profundidad con el objetivo primario de encontrar fluidos con tempera-

¹⁷ Gallup, D.L. (2009) Production engineering in geothermal technology: A review. *Geothermics*, Vol. 38 (3), pp. 326-334.

¹⁸ Massachusetts Institute of Technology, MIT (2006) The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. MIT, USA, 372 p.; http://www1.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html.

turas en el intervalo de 450-600°C y de estudiar las propiedades de los fluidos confinados en estos sistemas.

Aunado a estos dos últimos sistemas, existe otro grupo promisorio de fuentes geoenergéticas presentes en la Tierra, los cuales han sido poco explorados y estudiados, y por ende aún no visualizados tecnológicamente como fuentes probables de explotación; entre éstos se encuentran los sistemas: Geopresurizados, Radiogénicos, Marinos y Magmáticos.

Los Sistemas Geopresurizados contienen metano disuelto en los fluidos y se forman en cuencas sedimentarias geológicamente jóvenes. Los fluidos se encuentran atrapados en zonas profundas que soportan la carga de rocas, desarrollando presiones considerablemente altas (~700 bares) y temperaturas entre 90°C y 200°C. Estos sistemas ofrecen la ventaja de poder proveer 3 tipos de energía: térmica, química y mecánica. Los Sistemas Radiogénicos son generados por el decaimiento radioactivo de los isótopos naturales de torio, potasio y uranio, procesos que liberan importantes cantidades de energía. Los Sistemas Marinos se presentan en el fondo del mar como fumarolas o chimeneas hidrotermales. Expediciones realizadas en algunos lugares indican que estos sistemas podrían constituir en el futuro una importante fuente geoenergética a explotar debido a que los fluidos que se producen son de alta entalpía. Finalmente, los Sistemas Magmáticos están asociados con estructuras volcánicas activas situadas a gran profundidad en zonas de debilidad cortical y con temperaturas muy altas (>800°C). Aún cuando estos últimos sistemas disponen un potencial energético muy alto, presentan poca viabilidad de explotarse en el futuro, por lo que todavía representa un reto tecnológico muy grande el desarrollo de tecnología para aprovechar sus recursos.

Principales aplicaciones de los recursos geotérmicos

En la actualidad los sistemas hidrotermales convectivos son las fuentes geotérmicas más explotadas. El aprovechamiento de su energía se logra mediante la extracción del fluido a través de pozos perforados profundos (del orden de 3.5 km). Una vez que se aprovecha la mayor parte de su energía, el fluido remanente es regresado al subsuelo a través de pozos de reinyección para evitar la afectación al medio ambiente.

La energía geotérmica extraída es utilizada en superficie para la producción de electricidad usando turbogeneradores convencionales accionados por vapor (en el caso de los sistemas de alta entalpía) o mediante procesos de ciclo binario, en el caso de sistemas de mediana entalpía. Igualmente, este tipo de recursos tiene otros usos directos, entre los cuales destacan: (i) El acondicionamiento climático de espacios y distritos mediante bombas de calor geotérmicas, para lo cual se emplea el subsuelo como fuente de calor (para calentamiento) o sumidero (para enfriamiento); (ii) La purificación de efluentes industriales mediante bombas de calor o transformadores térmicos en los cuales se emplea el fluido geotérmico residual como fuente de energía para purificar efluentes; (iii) La recreación (balneología¹⁹ y turismo) y los tratamientos medicinales; (iv) El acondicionamiento térmico de invernaderos (agricultura, floricultura e hidroponía); (v) El acondicionamiento térmico para criaderos de especies: peces, mariscos, cocodrilos, etc.; (vi) El uso de calor para procesos industriales y de manufactura (v.g. secado de madera y alimentos); entre otros usos.

Tecnologías actuales - producción de energía eléctrica

En la actualidad existen comercialmente tres tipos de plantas convencionales usadas para la generación de electricidad: vapor seco, flasheo de vapor y ciclo binario. La planta de vapor seco aprovecha el fluido extraído, en forma de vapor, conduciéndolo directamente a un turbogenerador para producir electricidad.

Las plantas de flasheo de vapor usan agua caliente o mezcla agua-vapor en condiciones de presión y temperatura relativamente elevadas (≥ 200 °C). A medida que se extrae el fluido del fondo, su presión disminuye, lo que provoca una evaporación súbita (o flasheo) y la producción de una mezcla de agua-vapor. Este fluido bifásico es separado en la superficie mediante centrifugación para la obtención de vapor y su conducción final hacia los sistemas de turbogeneración para la producción de electricidad.

¹⁹ Se entiende por Balneología a la ciencia que estudia, analiza e investiga los medios curativos naturales que se dan en un determinado lugar al que denominamos Balneario, estableciendo los métodos y procedimientos más adecuados a emplear para la aplicación de dichos medios con fines terapéuticos.

Las plantas de ciclo binario aprovechan generalmente fluidos geotérmicos de mediana temperatura ($<200^{\circ}\text{C}$). Estos fluidos ceden su energía térmica a un fluido orgánico de bajo punto de ebullición en un intercambiador de calor, el cual al evaporarse y realizar un proceso cíclico de turbogeneración produce electricidad. En cualquiera de las tres tecnologías (vapor seco, flasheo de vapor o ciclo binario), una vez que se aprovecha la energía del fluido geotérmico, éste es regresado nuevamente al subsuelo para primordialmente, resolver el problema de disposición de fluidos de desecho y con ello evitar afectar al medio ambiente, y en forma secundaria, para recargar el sistema térmica e hidráulicamente y lograr así un proceso global de producción ambientalmente sustentable.

Estado actual de desarrollo mundial - producción de energía eléctrica

La producción de electricidad, bajo las tecnologías actuales desarrolladas, ha sido reservada en principio, a los Sistemas Hidrotermales Convectivos o reservorios de alta temperatura, razón por la cual se ha explotado sólo una fracción muy pequeña ($\sim 10\%$) de la inmensa cantidad de energía disponible en la Tierra. Esto se debe básicamente a la limitada existencia de estos sistemas en el planeta debido a sus condiciones restrictivas, a saber, zonas geológicas con propiedades petrofísicas adecuadas, profundidades accesibles, y sobretudo, una disponibilidad de fluidos con temperaturas anormalmente altas ($>200^{\circ}\text{C}$) y una recarga natural de estos reservorios.

Estas limitaciones se han reflejado en el número actual de proyectos geotermoeléctricos instalados en 25 países, entre los cuales destacan por su producción y capacidad instalada, Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, México, Italia, Islandia, Nueva Zelandia, y algunos países de Centroamérica y del Este de África²⁰. En lo que se refiere a la explotación de los sistemas geotérmicos de baja y mediana temperatura ($<200^{\circ}\text{C}$ y mucho más disponibles en la Tierra) con fines eléctricos, estos recursos están siendo actualmente aprovechados mediante plantas de ciclo binario, como está ocurriendo en países tales como Estados Unidos, Alemania y Australia. Se espera en el corto

²⁰ Bertani, R. (2007) World geothermal generation in 2007. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Septiembre 2007, Klamath Falls, Oregon, pp. 8-19.

plazo un incremento en la capacidad mundial instalada de plantas geotermoeléctricas, con instalaciones de pequeña y mediana potencia.

Las principales emisiones de plantas geotermoeléctricas consisten en vapor de agua con un contenido mínimo de gases. Dependiendo del tipo de fuente usada, la generación de electricidad produce emisiones de CO₂, tales como: gas (453 g/kWh); hidrocarburos (906 g/kWh) y carbón (1042 g/kWh); en contraste, la geotermia produce entre 13 y 272 g de CO₂/kWh. Por tanto se ha reconocido que la explotación de la geotermia ayuda a reducir impactos negativos al medio ambiente y a mitigar el calentamiento global de la Tierra²¹.

Estado actual de desarrollo mundial - usos directos

Las aplicaciones directas de la energía geotérmica registradas actualmente están referidas esencialmente a Sistemas Hidrotermales Convectivos de baja o mediana temperatura (<200°C). Estas aplicaciones alcanzaron el 80% del aprovechamiento de estas fuentes en 72 países, exhibiendo así un importante crecimiento del 74.4% entre 1999 y 2005. En este periodo, el 32% de los recursos geotérmicos se emplearon en bombas de calor, 30% en recreación (baños y natación), 20% en calentamiento de espacios (primordialmente en calefacción distrital), 7.5% en invernaderos y calentamiento de suelos a cielo abierto, 4% en calor de procesos industriales, 4% en acuicultura y calefacción de estanques, <1% en secado agrícola, <1% para derretir nieve y 0.5% en otras aplicaciones²².

Situación en México

La evaluación del potencial geotérmico disponible en México, por ser una tarea muy compleja aún no está resuelta. En la actualidad sólo se explotan Sistemas Hidrotermales Convectivos de vapor y líquido dominante, con los cuales la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha logrado adquirir

²¹ Kagel, A., Gawell, K. (2005) Promoting geothermal energy: Air emissions comparison and externality analysis. The Electricity Journal, Vol. 18, Issue 7, 90-99.

²² Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L. (2005) Worldwide Direct-Uses of Geothermal Energy 2005. Geothermics, Vol. 34 (6), 691-727.

experiencia tecnológica para explotar los recursos en los campos geotérmicos identificados. Actualmente se tiene una capacidad instalada de 965 MWe ($\sim 2.0\%$ de la capacidad efectiva total del país), a través de la explotación comercial de cuatro campos geotérmicos: (i) Cerro Prieto, Baja California con 720 MWe (75%); (ii) Los Azufres, Michoacán con 195 MWe (20%); (iii) Los Humeros, Puebla con 40 MWe (4%); y (iv) Las Tres Vírgenes, Baja California con 10 MWe (1%)²³. Con esta capacidad instalada, México se encuentra en cuarto lugar a nivel mundial en generación geotermoeléctrica, después de Estados Unidos (2,687 MWe), Filipinas (1,970 MWe) e Indonesia (992 MWe). Estudios prospectivos indican, que para el 2010, esta capacidad instalada será incrementada hasta 1,178 MWe a través de la construcción de nuevas plantas en los campos de Cerro Prieto V (100 MWe) y Los Humeros II (46 MW). Asimismo, esta capacidad será probablemente aumentada con el proyecto reestructurado del campo geotérmico de Cerritos Colorados, localizado en Jalisco (anteriormente conocido como La Primavera), cuyo potencial estimado es de ~ 75 MW.

En cuanto a los usos directos, éstos se han concentrado en aplicaciones de recreación (balneología) con una capacidad instalada estimada en ~ 164.6 MWt, la cual procede de alrededor de 160 sitios hidrotermales distribuidos en 19 Estados de la República Mexicana²⁴. Los recursos obtenidos de estos sitios alcanzan una producción de $\sim 12,500$ t/hr de agua caliente con temperaturas promedio de $\sim 50^\circ\text{C}$. Por otra parte, la CFE ha desarrollado también algunos proyectos piloto de otras aplicaciones directas en los campos geotérmicos de Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros, entre las cuales destacan: la extracción secundaria de minerales en lagunas de evaporación; la calefacción de oficinas e invernaderos; el secado de frutas y verduras; el germinado de bulbos; la producción acelerada de flores y hongos comestibles; y el secado de madera.

Igualmente, en algunos Centros de Investigación se han realizado trabajos experimentales con bombas de calor que utilizan calor de desecho geotér-

²³ Comisión Federal de Electricidad, www.cfe.gob.mx

²⁴ Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Quijano-León, J.L. (2005) Update of geothermics in Mexico. In: Proc. of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April, 10 p.

mico como fuente primaria para aplicaciones de refrigeración y purificación de efluentes industriales²⁵.

Líneas de I&DT futuras para su implantación en los próximos 10 años en México

Desde el punto de vista técnico y con el objeto de que “la explotación geotérmica sea más sustentable, confiable, competitiva y rentable”, es crucial incrementar las tareas de investigación y desarrollo tecnológico en el corto y mediano plazo para: (a) Mejorar los métodos de exploración y explotación de los sistemas geotérmicos convencionales, incluyendo el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de los sistemas de roca seca caliente; (b) Asimilar y/o desarrollar tecnologías para la perforación y construcción de pozos geotérmicos direccionales; (c) Plantear estrategias para el aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos, considerando la generación de electricidad con plantas convencionales y de ciclo binario, esquemas de cogeneración y usos directos en procesos en cascada; y (d) Optimizar las plantas de generación mediante la investigación de nuevos ciclos termodinámicos más eficientes; entre otras.

Ante la necesidad de resolver estas dificultades, la meta a futuro de la industria geotérmica será abatir los costos, en al menos un factor de 3, en nuevas tecnologías de exploración, perforación, estimulación de yacimientos y conversión termoeléctrica. De manera más específica, se plantea para México igualmente trabajar en las siguientes líneas de investigación y desarrollo tecnológico:

- a) Evaluación del recurso en sistemas hidrotermales convectivos convencionales y no-convencionales, a través de:
 - Estimaciones más realistas y confiables del potencial geotérmico disponibles en los campos geotérmicos ya identificados mediante la

²⁵ Holland, F.A., Siqueiros, J., Santoyo-Gutierrez, S., Heard, C.L., Santoyo, E. (1999) Water purification using heat pumps. E & FN SPON/Routledge, U.K., ISBN: 0-419-24710-6, 256 p.

modelación de procesos térmicos y químicos considerando los reservorios y las fuentes primarias de calor o cámaras magmáticas²⁶.

- El desarrollo de nuevos métodos de exploración (geoquímicos y geofísicos), a fin de mejorar la eficiencia y la economía de los sistemas hidrotermales de todo tipo²⁷.
- La optimización de las técnicas de exploración, con objeto de reducir la incertidumbre en la localización del recurso y con ello disminuir los costos.
- Desarrollo de bases de datos y su acoplamiento a sistemas de información geográfica (GIS) para su aplicación en exploración y explotación.
- Perfeccionamiento de metodologías experimentales para la determinación de propiedades geológicas de los componentes de un sistema geotérmico (formación, composición química e isotópica, fluidos, suelos, interacción roca-agua, etc.), con objeto de definir mejor la infraestructura (tuberías, cementos, materiales, fluidos de perforación anticorrosivos, sistemas de medición resistentes y exactos, etc.).
- Estudios geoquímicos de elementos traza y sus implicaciones en exploración, explotación y en impacto ambiental.
- Implantación de estudios geoquimiométricos para asegurar la calidad de datos, útiles en la evaluación de incertidumbre en modelos matemáticos y físicos de los sistemas geotérmicos²⁸.

²⁶ Verma, S.P., Andaverde, J., 2007, Coupling of thermal and chemical simulations in a 3-D integrated magma chamber-reservoir model: A new geothermal energy research frontier, in *Geothermal Energy Research Trends* (H.I. Ueckermann, ed.): Nova Science Publishers, New York, USA, Chapter 7, pp. 149-188.

²⁷ Díaz-González, L., Santoyo, E., Reyes, J. (2008) Tres nuevos geotermómetros mejorados de Na/K usando herramientas computacionales y geoquimiométricas: aplicación a la predicción de temperaturas de sistemas geotérmicos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol 25 (3): 465-482.

²⁸ Verma, S.P. (2005). *Estadística básica para el manejo de datos experimentales: Aplicación en la geoquímica (Geoquimiometría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, D. F., 186 p.

- Optimización de ciclos termodinámicos para mejorar la eficiencia de las plantas geotermoeléctricas convencionales y de ciclo binario²⁹.
- Reforzamiento de los programas de I+D en el área de diseño de equipos de superficie.
- b) Reducción de costos en la construcción de pozos geotérmicos (perforación, cementación y registros de propiedades: presión, temperatura, etc.):
- Desarrollo de tecnologías de perforación y de construcción de pozos, que logren subsanar los obstáculos que presentan las altas temperaturas, los fluidos corrosivos y la roca dura (diámetros más grandes, perforación balanceada dentro del yacimiento productor, pozos direccionales, nuevas barrenas, etc.).
- Formulación de fluidos de perforación y cementos resistentes a las altas temperaturas.
- Solución a los problemas de pérdidas de circulación e identificación de zonas permeables.
- Estimación de temperaturas estabilizadas y calibración de simuladores numéricos para el estudio del historial térmico del pozo.
- c) Mayor promoción del aprovechamiento de la Energía Geotérmica en Usos Directos:
- Impulso de la aplicación de bombas de calor geotérmicas para la climatización de espacios (programas de ahorro y uso eficiente de energía).
- Aprovechamiento integral de la energía de baja y media temperatura, usando procesos tipo cascada y de cogeneración (ciclos binarios).
- Mejoramiento de las técnicas de ingeniería de yacimientos, buscando incrementar la extracción de energía y reducir costos.
- Incremento de la capacidad geotermoeléctrica.

²⁹ Chamorro-Camazón, C. (2009) Energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos. Estado actual y perspectivas a nivel mundial. Dyna, Vol. 84 (1), pp. 44-51.

- Identificación de regiones en donde confluyan la necesidad de climatización y el recurso hidrotermal, con objeto de promover el uso de bombas de calor geotérmicas.
- Aprovechamiento de la infraestructura geo-eléctrica en funcionamiento, que al operar de manera eficiente permiten la formación de recursos humanos en las distintas áreas de este ciclo de combustible.

d) Impacto Ambiental:

- Desarrollo de técnicas de secuestro y de reinyección de CO₂ en formaciones geológicas (rocas basálticas y sedimentarias).
- Explotación secundaria de extracción de minerales como política adicional de disposición -utilización- de fluidos residuales o de desecho.
- Remoción de contaminantes y técnicas remediación en la exploración y explotación geotérmica.

e) Exploración y Explotación de Nuevos Sistemas Geotérmicos (EGS, SGS, Marinos, Magmáticos y Geopresurizados):

- Investigación, desarrollo tecnológico y exploración de sitios potenciales relacionados con sistemas geotérmicos de roca seca caliente.
- Desarrollo de materiales avanzados que se adapten a campos con condiciones más extremas.
- Aceleración de la asimilación tecnológica de los procesos y sistemas convencionales y en desarrollo (v.g. pozos horizontales y direccionales), a fin de promover la independencia tecnológica del país.

f) Desde el punto de vista de política energética y con el objetivo de “impulsar e incrementar la capacidad de generación geotermoeléctrica y diversificar sus usos directos para garantizar su desarrollo sustentable”, se propone:

- Promover la aplicación de la energía geotérmica de baja y mediana temperatura para apoyar programas de ahorro y uso eficiente de energía en sitios donde se encuentre disponible.

- Lograr que el gobierno reconozca en la energía geotérmica una alternativa más para satisfacer la futura demanda de energía.
- Ajustar el precio de la energía generada a partir de fuentes renovables con respecto al precio de tecnologías convencionales.
- Impulsar la investigación para mejorar la tecnología actual, especialmente en la perforación de pozos profundos direccionales y el diseño de nuevas plantas de generación/co-generación.
- Preparar recursos humanos altamente especializados para enfrentar los nuevos retos científicos y tecnológicos de los sistemas geotérmicos de nueva generación.
- Educar a la población sobre los beneficios directos de la energía geotérmica, entre otras.



Energía hidráulica a pequeña escala

Estado del arte y perspectivas de aprovechamiento

Esta tecnología aprovecha la energía potencial asociada a las caídas de agua y a la diferencia de alturas entre dos puntos del curso de un río, así como su energía cinética, alimentándose el fluido a una turbina (hidráulica) para generar electricidad.

Las centrales se pueden clasificar según la forma en la que se recibe y se produce la acumulación del agua o por la potencia producida; así, pueden ser de agua fuente (sin ningún tipo de regulación del caudal el cual varía en función del régimen hidrológico anual) o de flujo regulado (a través de un depósito de ajuste diario, semanal o mensual), las que además se pueden emplear en otros fines (riego o abastecimiento de agua). En cuanto a su potencia se tienen: Micro centrales (1 a 100 Kw), Mini centrales (100 KW a 1.0 MW) y Pequeñas centrales (de 1.0 a 30.0 MW).

Contrario a las grandes centrales hidroeléctricas, estas categorías presentan un mínimo impacto ambiental y permiten el acercamiento al usuario, facilitando su gestión a nivel local; además, permiten dar servicio a zonas aisladas ó interconectadas a redes de distribución, presentan múltiples posibilidades de localización y por lo general son competitivas con otras fuentes, tanto convencionales como renovables.

A la fecha, la tecnología para esta escala de aprovechamiento está mundialmente muy desarrollada, aunque debido a que este tipo de instalaciones se diseñan en función de las necesidades a satisfacer y de las condiciones del sitio, sólo es factible estandarizar determinadas partes, debiéndose dise-

ñar, construir y manufacturar el resto según sean los requerimientos de cada proyecto.

De aquí que los campos para el desarrollo tecnológico se encuentran básicamente en modelación para cada una de las fases de un proyecto de esta índole (desde el comportamiento de la cuenca, pasando por el de las partes del sistema y de éste en su conjunto).

Situación en México

A pesar de la amplia aplicación de la energía hidráulica en el país, aún no se conoce el 100% de su potencial real, aunque una estimación de la CONAE (hoy CONUEE) de hace años lo ubica en 3.2 GW. Hasta la fecha solamente se ha desarrollado 80MW y en construcción existen 104 MW. Por otro lado, el recurso se encuentra distribuido de manera no uniforme en el territorio, dado que se concentra en el sur-sureste y pacífico norte. Es prácticamente escaso en el centro y norte del país.

Los estados de Chiapas, Tabasco, Oaxaca y Veracruz son los que presentan el mayor potencial y es donde se han construido grandes centrales; no obstante, se tienen cuencas que se pueden aprovechar con desarrollos de menor escala, aunque muchas de ellas requieren ser evaluadas, para determinar el tamaño de los sistemas a instalar.

Entre las ventajas que ofrecen los proyectos hidroeléctricos en pequeña escala es su carácter amigable con el medio ambiente, al presentar impactos mínimos, contrario a las grandes centrales que inundan extensas áreas, causando la migración o incluso la desaparición de diversas especies de fauna y flora. De aquí que esta escala de aprovechamiento contribuirá al manejo sostenible de las cuencas. En adición, se promueve el uso múltiple del agua (generación de energía, riego y abasto de agua) y el ecoturismo, además de tener impactos favorables en el microclima.

Presenta por tanto un fuerte atractivo para el suministro de energía y agua a los municipios, con ahorros potenciales en las erogaciones por este concepto que van del 10-40% respecto de las tarifas de CFE. Igualmente ofrece la posibilidad de desarrollar generación eléctrica distribuida ya sea conectándose a las redes de distribución o de manera descentralizada.

Para el aprovechamiento integral de este recurso a estas escalas menores se hace necesario crear un Plan Maestro a nivel nacional para continuar con la evaluación del potencial en los estados y coordinar los esfuerzos entre los diversos actores participantes.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

Una vez más y como se señaló previamente, la acción básica para el aprovechamiento del recurso hidráulico en sus diversas escalas (pequeñas, mini y micro) es la evaluación del recurso en todo el país; se han evaluado las cuencas de los ríos Nautla, Tecolutla y Culiacán, experiencias que hay que extender a otras regiones.

Dada la madurez de esta tecnología, lo que requiere México es contar con personal altamente capacitado para realizar la selección más adecuada de cada una de las partes que componen un proyecto, teniendo en cuenta las normas “regularizadas” de integración de los sistema y de que el tamaño y ciertos elementos (como la turbina) deben ser calculados y manufacturados en cada caso. A partir de lo anterior, las tareas a promover son las siguientes:

- Desarrollar ó adaptar modelos hidrológicos distribuidos a fin de incrementar la precisión de las estimaciones del caudal medio y generar series diarias y multianuales en cada confluencia y por tramo de ésta.
- Mejorar el conocimiento del territorio (mediante convenios con el INEGI y otras entidades públicas), a fin de estructurar una base de datos que permita ubicar los mejores sitios para estas instalaciones hidráulicas (sistemas de información geográfica, modelos digitales de elevación de alta resolución, infraestructura eléctrica y de caminos, mapas de textura de suelo, análisis fisiográfico de cuencas, delimitación, codificación y toponimia de hidrografía, etc.). Es pertinente buscar alguna forma de colaboración con la NASA en materia de modelos digitales de elevación de terreno.

- Establecer programas de capacitación específicos en centrales hidráulicas de pequeña escala, que incluyan desde diseño y manufactura de equipos, hasta la instalación, operación y mantenimiento de estos sistemas.

Definir programas de I&D para:

- El estudio de los impactos ambientales.
- El comportamiento de equipos mecánicos y eléctricos en busca de maximizar la eficiencia y minimizar costos.
- El desarrollo de modelos de optimización de las partes del sistema que minimicen los costos de operación y mantenimiento.
- La regularización de los procedimientos de diseño, de los arreglos generales de los sistemas.
- La transferencia y posterior desarrollo propio de turbinas de baja y muy baja carga, las que no dañen la fauna del caudal, de velocidad variable, de autoventeo y los motores de desplazamiento.
- El desarrollo de los sistemas de control avanzados.
- La promoción de la industria nacional de equipos para este sector, con base en diseños estandarizados de las partes factibles de fabricar en masa, a partir de las cuales conformar los sistemas integrales en función de las necesidades a satisfacer.

Energía oceánica

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

Los océanos representan un recurso de energía renovable (ER) extraordinario, pero hasta ahora sin explotar. Éste se presenta básicamente en forma de mareas, olas, corrientes y gradientes térmicos y salinos.

Después de algunas décadas de investigación y desarrollo en nuevas tecnologías, la utilización de este recurso está a punto de volverse realidad, con la próxima instalación de dispositivos de energía del oleaje. De acuerdo con los programas de los fondos nacionales e internacionales dedicados a las ER, se espera una inversión de más de 300 millones de dólares en la investigación y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía del océano.

Las últimas pruebas hechas a los dispositivos piloto han demostrado que esta tecnología tiene que avanzar rápidamente, en cuanto a los sistemas mismos y a mayores estándares de los componentes, a fin de mejorar su fiabilidad y funcionamiento en diferentes aplicaciones, lo mismo que en lo relativo a sus aspectos ambientales y a su conexión a las redes de distribución eléctrica.

En este campo, la Unión Europea es la que más ha avanzado en ciencia y tecnología, tal como lo establecen las directrices plasmadas desde su VI Programa Marco de I&DT lanzado en 2002, a realizar por el Grupo de Acciones Coordinadas en Energía del Océano. En este plan, el trabajo está orientado a desarrollar desde el conocimiento base hasta la fase de demostración tecnológica, con el fin de avanzar en una siguiente etapa a su aplicación y comercialización.

Con objetivos similares trabaja dentro de la Agencia Internacional de Energía, en un programa internacional de colaboración en el campo de la energía, una sección AIE-OES (Ocean Energy Systems), con diversos grupos de trabajo abocados en forma específica a: obtener y diseminar información, así como auxiliar en las pruebas de prototipos y en la integración a la red; recientemente se formó uno más, orientado a la evaluación de los impactos ambientales de los diversos sistemas de energía oceánica. Actualmente, 25 naciones están integradas a estos grupos, incluido México.

Situación en México

México no tiene una política específica para la energía del océano, sino que ésta se ubica dentro de las existentes para fomentar las ER. No obstante, existen avances en esta materia, gracias a la iniciativa de instituciones de investigación como la UNAM y de su interrelación con universidades y gobiernos internacionales.

La Comisión Federal de Electricidad, por su parte, está trabajando en un proyecto de energía de oleaje, en Rosarito, Baja California, para fines múltiples: generación eléctrica, desalinización o una combinación de ambos. Se tiene un cierto nivel de coordinación, consultoría y administración por parte de DEFAESA (Desarrollo de Fuentes Alternas Energéticas, S.A. de C.V.) y su representada Oceanlinx (empresa australiana líder en el aprovechamiento de energía del océano que patentó la tecnología OWC: Oscillating Water Column (oscilación de columna de agua). Esta compañía asesora en la selección del sitio adecuado, además de asegurar el buen funcionamiento de su tecnología y la mejor metodología para instalar exitosamente el dispositivo diseñado en función de los requerimientos específicos de la ubicación.

La tecnología de Oceanlinx consiste en una cámara que comprime aire con el movimiento de ascenso y descenso del oleaje, el cual impulsa una turbina de reacción para producir electricidad. Una unidad simple puede generar entre 0.1 MW hasta 1.5 MW, dependiendo de las condiciones del sitio y de la demanda a satisfacer. La capacidad de cada unidad se fabrica en función de cada escenario y necesidad, sea la relacionada con el consumo o con las características de la red a la que se conecta.

Un desarrollo en México es un dispositivo para aprovechar el movimiento del oleaje, el cual consta de un grupo de 20 células hexagonales que contienen los mecanismos para transformar el oleaje en energía mecánica y ésta a su vez en eléctrica. Cada célula está integrada por un flotador que se desplaza verticalmente al paso de las olas, guiado por las paredes de las células y un vástago central, accionando un sistema de engranes por medio de una cremallera colocada a lo largo del eje. En las pruebas este dispositivo trabajó satisfactoriamente, por lo que es probable que la CFE y el Instituto de Ingeniería de la UNAM trabajen conjuntamente para impulsarlo.

En el Instituto de Ciencias de Mar y Limnología se está desarrollando una bomba de agua de mar. Se trata de un dispositivo que comprime aire para sincronizar el movimiento de ascenso y descenso del oleaje dentro de una cámara de resonancia y de esta manera hacer fluir el agua de un lado de la costa hacia una laguna costera o estero. La idea fundamental del dispositivo es el saneamiento de este tipo de cuerpos de agua por medio de agua de mar sin consumo de energía eléctrica.

El proyecto IMPULSA de la UNAM está desarrollando dos dispositivos de conversión de energía marina a eléctrica. Uno aprovecha el calor de las ventilas submarinas, de las cuales México tiene gran potencial en el Golfo de California. Se trata de una turbina de ciclo binario, en la cual el fluido de trabajo pasa de líquido a vapor en un intercambiador colocado en la ventila. El otro es un hidrogenerador, que aprovecha las corrientes marinas; esta tecnología se clasifica dentro de los dispositivos flotantes de eje vertical y flujo conducido, el cual tiene una carcasa que aloja dos rotores y que orienta el flujo convenientemente sobre sus alabes para aumentar el torque, y además cuenta con dos concentradores tipo venturi para incrementar la velocidad del flujo y captar más energía.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

La I&DT en el campo de la energía oceánica debe iniciar con la evaluación del recurso y con el avance del conocimiento de las diferentes formas de aprovechar la energía del océano, a fin de poder definir una estrategia de desa-

rollo específica a esta fuente renovable. Es importante también incrementar sustancialmente los recursos humanos existentes.

De manera más específica se debe:

- Realizar mediciones y aplicar modelos numéricos para la evaluación precisa del recurso.
- Fortalecer los grupos de I&DT existentes, a través de dotarlos de recursos suficientes para alcanzar en el corto plazo su masa crítica de desarrollo.
- Incursionar en la I&DT de las distintas tecnologías: a) de mareas: turbinas de eje horizontal, vertical y laminar, y otras; b) de las olas: sistemas de columna de agua oscilante de tipo terrestre, cerca de la costa, flotantes; c) sistemas absorbedores: puntuales, multi-puntos, flotador direccional; d) dispositivos de péndulo invertido, etc.
- Estudiar la afectación a la zona costera y a los procesos físicos: hidrodinámica, arrastre de sedimentos, comportamiento ante eventos extraordinarios etc.
- Determinar las metodologías para la ubicación adecuada de sitios y las medidas de mitigación de los impactos ambientales adversamente potenciales.
- Fortalecer la colaboración interinstitucional, nacional e internacional, a fin de favorecer la transferencia tecnológica y con ello el desarrollo autóctono.

Energía en edificaciones

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

Aún cuando la percepción general del consumo de energía en las edificaciones no es muy clara, las estadísticas internacionales y nacionales demuestran que en forma directa e indirecta los edificios consumen entre el 30 y el 50% de la energía total consumida en el país. Por ello es indispensable plantear estrategias y medidas de ahorro en el consumo de energía para los edificios.

Los países miembros de la Unión Europea, Japón, Australia, Nueva Zelanda, Canadá y Estados Unidos entre otros, han están implementando desde todos los niveles de gobierno y a través de la iniciativa privada normas y estándares de calidad en las edificaciones que les permitan reducir de manera significativa el consumo de energía y en algunos casos obtener edificios con “huella cero”.

De acuerdo con estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency IEA) del balance energético mundial, para 2004-2005(2007 edition), el total del uso final de energía fue de 7209 Mtoe (Mega Tonnes Oil Equivalents). El Sector residencial y el comercial consumieron respectivamente 1951 Mtoe and 638 Mtoe, que es casi el 40% del uso final de la energía en el mundo.

Tratar de reducir el consumo de energía en las edificaciones es una tarea en la que están involucrados muchos grupos en todo el mundo. En este documento se presenta la conveniencia de contar con reglas o normas para mejorar

la eficiencia en el consumo de energía en las edificaciones, así como para la incorporación de sistemas de generación de energía renovable.

Normatividad oficial. Casi todos los países desarrollados han establecido criterios normativos y reglamentarios para las edificaciones en relación a su desempeño energético y a la eventual incorporación de energía renovable (ER). Destaca en este marco la normatividad de la Unión Europea y los criterios energéticos implementados por Japón y Australia. Ha sido en fechas muy recientes que la Agencia de Energía de Estados Unidos ha impulsado una política gubernamental clara hacia estos temas. En México la normatividad oficial se concretó en la NOM-ENER-008 y en la propuesta de la NOM-ENER-020 que aún está en anteproyecto. Sin embargo, la implementación de la NOM-008 ha sido suspendida por la Secretaría de Comercio al no existir los mecanismos adecuados para la aplicación.

Certificación voluntaria. También se han propuesto e implementado normas “voluntarias” estrictas y específicas (equivalentes a las certificaciones ISO) que han sido desarrolladas por asociaciones profesionales en coordinación con diferentes instancias gubernamentales. Aquí destacan las certificaciones BREEAM (UK), LEED (US), GB Tool (Canada) y CASBEE (Japón) las cuales tienen éxito particularmente entre las grandes corporaciones transnacionales que pueden agregar las certificaciones de múltiples edificios e instalaciones y conseguir estímulos económicos internacionales en bonos de carbono y/ subsidios o estímulos económicos.

En los países o regiones donde se han adoptado reglamentos obligatorios se ha notado que el consumo energético en las edificaciones ha dejado de crecer como es el caso del estado norteamericano de California donde a partir de la publicación del Title 24, se implementaron normas y reglamentos muy rigurosos, y el consumo de energía per capita se ha reducido en promedio 40% con respecto a otros estados del mismo país que no tienen las mismas normas.

Existen diferentes opiniones respecto a si es mejor que las regulaciones sean obligatorias o voluntarias, sin que a la fecha se vea algo contundente para optar entre una u otra opción. Lo que sí se sabe es que los reglamentos o estándares referentes a mejorar los requisitos energéticos en edificios nuevos es una de las medidas más simples e importantes para lograr edificios con alta

eficiencia energética. Mejorar la eficiencia en edificios nuevos es mucho más fácil que en edificios ya construidos y su impacto es mayor.

El aumento reciente de 27.2% en la población nacional que pasó de 81.2 millones de habitantes en 1990 a 103.3 millones en el 2005 (INEGI), aunado al desarrollo económico y los programas gubernamentales, ha tenido como consecuencia un incremento aún mayor (48.7%) en el número de viviendas que pasaron en el mismo período de 16.2 millones en 1990 a 24.1 millones en 2005 (INEGI). Incrementos similares se están presentando en otros tipos de edificios, lo que indica claramente un aumento en los espacios construidos que tiene como consecuencia un incremento en el consumo de energía en ellos.

Las líneas de investigación más generales relacionadas con la temática de energía en edificios a nivel internacional son a grandes rasgos:

- Eficiencia térmica.
- Optimización de la iluminación.
- Generación de energía en edificios.

Las primeras dos se enfocan desde dos puntos de vista: optimización del diseño para ahorro de gastos de climatización artificial e iluminación natural y evaluación de las condiciones de confort lumínico y térmico. También se abordan los aspectos de confort ambiental en general, aunque los aspectos mencionados son los que tienen más impacto sobre la energía consumida. En cuanto a la última línea, fundamentalmente se investiga la integración de las energías renovables a los edificios, tanto desde el punto de vista del diseño, técnicas constructivas y materiales.

Situación en México

México es un país predominantemente cálido, donde las ciudades que presentan mayor crecimiento en la actualidad se ubican en la frontera Norte (climas cálidos secos) y en el sureste (climas cálidos húmedos), por lo que la tendencia al incremento en el consumo energético de los edificios se acentuará por el uso cada vez más frecuente de sistemas de aire acondicionado.

Por otra parte, no existen elementos en los reglamentos de construcción o en las normas técnicas vigentes que permitan construir edificios con la calidad necesaria para que los sistemas de aire acondicionado y/o calefacción funcionen eficientemente, lo que tiene como resultado un constante despilfarrero de energía que obliga a destinar una parte importante del ingreso al pago de facturas eléctricas y a que adicionalmente se apliquen subsidios mayores a las tarifas domésticas.

Al mismo tiempo necesitamos prever la necesidad de integrar sistemas de autogeneración en las edificaciones y promover su instalación y operación. Para ello es fundamental establecer normatividad que garantice el acceso al recurso solar y/o eólico y establecer reglas claras para la instalación, operación y mantenimiento de sistemas de generación energética alternativa en los edificios.

México tiene una variedad de climas que van desde el templado hasta el cálido seco y el cálido húmedo, sin embargo pese a esta variedad de climas, más del 70% corresponde a climas cálidos y de este 70% casi el 50% es clima seco o muy seco. Aunque predomina el clima cálido, existen regiones del territorio nacional, particularmente la zona Norte y las regiones montañosas, donde estacionalmente se presentan bajas temperaturas (INEGI, 2006). Esto significa que, en la mayoría del territorio, los espacios construidos tienen que integrar, en algún sentido, tecnologías de acondicionamiento ambiental.

Lo anterior se refleja en el Balance Nacional de Energía (SENER, 2006), que en la publicación del 2006 indica que del total de la energía consumida en México, casi el 20% corresponde a edificios del sector residencial, comercial y público y si consideramos la energía utilizada para la construcción, fabricación y transporte de materiales de construcción, esa cifra podría elevarse, como señala Mazria³⁰ casi al 45%. De esa energía, el 89% se produjo a partir de la quema de hidrocarburos, con el consecuente aporte de gases de invernadero y contaminación ambiental.

A pesar de lo anterior, el sector de la construcción en México, sobre todo el sector habitacional, no ha experimentado cambios que reflejen una preocupación por el medioambiente, el ahorro de energía ni el confort de los

³⁰ Mazria, E. 2003. It's the Architecture, Stupid! Solar Today, May/June 2003, pp. 48-51.

usuarios, por lo regular las viviendas se diseñan y construyen bajo criterios predominantemente comerciales.

Los grupos de investigación en México están trabajando sobre muchos de los aspectos que se investigan en el resto del mundo en cuanto a eficiencia térmica e iluminación, como diseño térmico y de iluminación natural, monitoreo de edificios, metodologías de análisis, confort, ventilación, normatividad, etc. Sin embargo, no son muy conocidas las investigaciones sobre incorporación de energías renovables a los edificios.

En México existen numerosos grupos de investigación dedicados a energía en edificios. Según registros de la Red Mexicana de Arquitectura Bioclimática ReMAB hay más de veinte.

Existe gran colaboración e intercambio entre estos grupos, y varios de ellos realizan proyectos conjuntos con financiamiento, además de intercambio de estudiantes y profesores-investigadores a nivel nacional e internacional.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

A pesar de los logros obtenidos, estos no son suficientes, por lo que se proponen acciones para la apropiación, fortalecimiento y desarrollo del área en el ámbito nacional. Para su mejor comprensión se han dividido en 4 líneas generales de investigación:

1. Sistematización de información y procedimientos para la evaluación energética de las edificaciones:
 - Complementar la normatividad nacional para la evaluación energética y certificación de las edificaciones.
 - Desarrollar programas de cálculo que contemplen las normas oficiales de evaluación.
 - Estandarizar las bases de datos climatológicos y de materiales para la evaluación energética.

2. Evaluación de parámetros y variables que determinan el confort ambiental:

- Establecer estrategias de diseño de edificaciones de bajo consumo de energía.
- Definir parámetros para sistemas de acondicionamiento ambiental.
- Definir parámetros de confort ambiental regional para evaluación energética.

3. Diseño eficiente de sistemas de iluminación natural y artificial:

- Establecer criterios de confort visual y ahorro de energía mediante adecuado diseño de iluminación.
- Establecer criterios de iluminación artificial para confort visual y ahorro de energía.

4. Desarrollo y caracterización de materiales y sistemas para la construcción y acondicionamiento ambiental:

- Integrar sistemas de autogeneración de energía en edificaciones nuevas.
- Desarrollar materiales y sistemas constructivos novedosos.
- Establecer parámetros para normas nacionales y evaluaciones de materiales y sistemas constructivos.
- Generar información base para análisis de consumo de energía.

Estrategias necesarias para atender las propuestas de investigación identificadas en el ámbito nacional:

Investigación:

- Definir líneas de Investigación prioritarias.
- Aumentar las alternativas de financiamiento a proyectos prioritarios.
- Hacer proyectos demostrativos en las diferentes regiones del país.

- Fomentar Programas de Transferencia de Tecnología con la industria de la construcción.
- Mejorar los mecanismos de vinculación de la academia con sectores productores y usuarios de energía.

Educación:

- Incidencia en planes de estudio de educación básica, media y superior.
- Capacitación y actualización profesional.

Normatividad:

- Revisar Normas Oficiales existentes y elaborar nuevas.
- Implementar medidas para su aplicación generalizada.
- Certificación Voluntaria (LEED, ISO, etc.).
- Incentivos para cumplir las normas o certificaciones.

Difusión:

- Campañas de información y divulgación dirigidas a profesionales de la construcción, tomadores de decisiones y público en general.
- Difundir solamente información con sustento científico y técnico.



Uso eficiente y ahorro de energía

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

El Uso Eficiente y el Ahorro de Energía (UEAE) es el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos a través de toda la cadena de procesos de conversión de la energía, desde sus fuentes primarias hasta sus usos finales. Esto se puede lograr a través de la implantación de diversas medidas a nivel tecnológico, económico, de gestión y de cambios en los hábitos culturales de la sociedad.

Tales acciones tienen diferentes grados de dificultad y por lo tanto de costos. De ahí que se busca iniciar con las de fácil aplicación e ir avanzando hacia las más complejas. Esta graduación de tareas está estrechamente vinculada con los mecanismos para alcanzar el UEAE, que van desde la eliminación de fugas, pasando por el uso óptimo de la tecnología en uso -en la que los sistemas de medición y control juegan un papel preponderante-, hasta el cambio de proceso (mejora tecnológica).

Sin embargo, es importante saber que todos los procesos energéticos tienen un origen, un uso y un destino final, el cual inicia en las denominadas fuentes primarias de energía a partir de las cuales y luego de una gran cantidad de procesos tecnológicos de conversión de la energía se van obteniendo fuentes secundarias de energía hasta llegar a la obtención de formas de energía útil que las sociedades usan para satisfacer sus necesidades básicas como cocción de alimentos, iluminación, transporte, acondicionamiento de aire, comunicación, diversión, etc.

Así el uso eficiente de la energía, tiene que concebirse para cada uno de los procesos energéticos involucrados desde la fuente primaria misma hasta su uso final y más aún, ya que el destino final de esta energía primaria transformada en calor y gases juega un papel muy importante en el equilibrio térmico entre el planeta tierra y el espacio exterior. El uso eficiente y el ahorro de energía es un ejercicio que debe involucrar a toda la cadena de procesos pero también el analizar desde el principio el uso final que se le pretende dar a la energía útil y al energético primario disponible.

El mundo ha pasado ya por todas estas fases, aunque ha habido períodos que se ha dado marcha atrás en estos avances, los cuales han estado relacionados con los lapsos de baja en los precios de los combustibles fósiles, en especial los hidrocarburos, que disminuye o incluso anula la rentabilidad de las inversiones en UAE.

De aquí que una de las vías para no perder los avances alcanzados sea la de informar, sensibilizar y aportar constantemente recomendaciones, a fin de estimular cambios en los consumidores, así como vincular el UAE no sólo a aspectos económicos, sino también de conservación de recursos no renovables y sobre todo los de tipo ambiental, dado que el UAE impacta muy favorablemente en la reducción de los efectos adversos al ambiente del uso de la energía.

El UAE se puede lograr tanto en el lado de la oferta (producción de energía) como en el de la demanda (consumo). En el primer caso cabe empezar “en casa”, pues es un hecho que el sector de producción y transformación de la energía es muy intensiva en este insumo, por lo que presenta un gran potencial para mejorar su eficiencia. Y estas oportunidades pueden ser mayores en unas regiones más que en otras, como es el caso de las centrales carboeléctricas de China, que consumen del orden de 22% más mineral que sus homólogas en EU.

Este fenómeno se repite en un gran número de países en desarrollo, en gran parte debido a que suelen adquirir tecnologías obsoletas, que además las utilizan de manera ineficiente, lo que en conjunto se traduce en una reducción del UAE entre 50-60%. Un ejemplo de esto se tiene en la falta de estándares de consumo energético en toda clase de equipos, destacando los motores en

el sector industrial y los electrodomésticos en el residencial, además del bajo remplazo de los vehículos en el transporte.

Por lo que respecta al UEAE del lado de la demanda, aquí se trata de abordar el problema en lo que se denomina “final de tubo” e igualmente presenta un muy importante margen de mejora. Esta opción fue la primera en abordarse cuando nació el concepto de UEAE en los años 1970s, con el primer choque petrolero. Tuvo un gran avance en Europa, en particular en Francia, donde incluso se acuñó el término de “yacimiento de las economías de energía” y se creó la primera institución abocada *ex profeso* a tratar este tema.

El descenso de los precios del petróleo relajó estos programas, que fueron retomados durante el segundo choque petrolero, con la misma suerte de freno tras este evento, hasta la actualidad, cuando esta materia se está abordando con un nuevo enfoque, que integra al menos cuatro criterios: la conservación de los recursos no-renovables, la disminución de los impactos ambientales negativos por el uso de los combustibles fósiles, el combate al fenómeno de cambio climático, y la seguridad energética, de gran relevancia, en particular en aquellas naciones dependientes del suministro externo.

Por lo anterior, actualmente, en la agenda internacional se ha retomado el concepto bajo el nombre de 4E: Eficiencia Eléctrica en los Equipos de Uso Final (Efficient Electrical End-Use Equipment), en virtud de que es este energético secundario (la electricidad) el que mayor tasa de crecimiento ha tenido en los últimos años y se espera continuará así en el futuro, además de que las medidas de su uso racional son las que presentan la mejor relación beneficio/costo en el corto plazo.³¹ De hecho, la AIE (Agencia Internacional de la Energía) estima que las mejoras en UEAE pueden contribuir a la reducción de 47% de las emisiones de CO₂ potencialmente alcanzables en el 2030, vinculadas con el sector energético. Sin embargo también en esta década del embargo petrolero de los países árabes se acuñó también el mismo concepto de las 4E pero bajo otra óptica: Energía, Economía, Ecología y Exergía, bajo el cual el desarrollo de una economía y de cualquier procesos energético debía

³¹ Esta relevancia actual de la EE es también producto del giro sustancial que ha adoptado EU en este tema con la nueva administración; de casi ser descartado durante la gestión de Bush, ha pasado a formar parte importante de la agenda energética de este país, como una de las vías para alcanzar la seguridad energética y combatir al mismo tiempo el cambio climático.

cumplir con todos estos conceptos, es decir que un proceso cualquiera debería ser energéticamente eficiente, económicamente viable, de bajo impacto ambiental y de alta eficiencia energética en cuanto a su mínima degradación energética, sobre todo en los procesos térmicos.

Esta búsqueda del UEAE se extiende a todos los sectores intensivos en energía, que después del energético, los de más alto índice de consumo son el de transporte y el industrial, donde se cuenta con un amplio conocimiento y experiencia sobre mejoras, que han ido más allá de la simple eliminación de pérdidas, habiendo llegado en muchos casos al cambio tecnológico, por ejemplo, en la industria petroquímica, siderúrgica, cementera, etc., y en el transporte con el aumento en el rendimiento de los automóviles.

Con el propósito de mantener esta dinámica y no experimentar una vez más el estancamiento, ahora se toman en cuenta las diversas barreras que han enfrentado las medidas de UEAE, que incluyen: información inadecuada y incompleta sobre las oportunidades que ofrece el UEAE, falta de un marco regulatorio y de organizaciones promotoras, inapropiados incentivos para su fomento, ausencia de estándares en los equipos, gestores de la energía con bajos niveles profesionales, y carencia de programas dirigidos a la modificación de los valores culturales.

Se ha detectado que una de las razones de la debilidad regulatoria e institucional se debe a que estos aspectos deben construirse con base en consensos entre diversas fuerzas y actores, lo que no es una tarea fácil. De hecho, los negocios energéticos se contraponen al concepto de UEAE, ya que su misión es la ganancia, misma que se logra con la maximización de las ventas de energía, por lo que los acuerdos a favor del UEAE se dificultan; sólo en un contexto público integral del sector energético es posible facilitar la convergencia de ambos intereses: el abasto de energía, con la máxima eficiencia. Energética y energética a lo largo de toda la cadena de procesos de conversión de energía.

En el presente hay que sumar la crisis económica, con importantes efectos adversos en el terreno laboral. En un entorno de mercado, con mayores costos del dinero y menores ventas implican una disminución de las ganancias, que se traducen por lo general en reducción de personal. Una vez más, la industria pública integrada puede contrarrestar este efecto, con una política laboral

orientada a los profesionales del sector energético a procurar el UEAE y con ello integrarse a lo que actualmente se denomina como “trabajos verdes”, que una de sus características es la de ofrecer oportunidades ocupacionales de largo plazo.

Y en el terreno de los estándares, hay un gran avance a nivel mundial, entre los que se pueden citar como ejemplo los siguientes: lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio y sus respectivas balastras, ventiladores de techo, anuncios de salida, transformadores de distribución tipo seco de bajo voltaje, señalamientos de tráfico: semáforos y señales para peatones, calentadores eléctricos, deshumidificadores, válvulas atomizadas comerciales, sistemas de acondicionamiento de aire, tanto en refrigeración como en calentamiento, refrigeradores y congeladores comerciales y domésticos, producción de hielo, lavadoras de ropa y platos. Igualmente, las empresas de equipo industrial, electrónico y electrodoméstico siguen mejorando sus estándares de consumo de energía, incluyendo mecanismos para contrarrestar el consumo de los conocidos coloquialmente como “vampiros” (“en reserva”: “foco rojo” de televisores, teléfonos, computadoras, etc.), que se ha estimado consumen del orden de 3% del consumo total final anual.

Todo lo anterior ha llevado a que las empresas energéticas y sus reguladores en general (eléctricas en particular) converjan en el criterio de que la “UEAE es también una opción de suministro”. Esta noción se basa en el hecho de que, el UEAE ha sido desde su “creación” un buen negocio, incluso para las compañías de abasto, dado que es una vía para minimizar las pérdidas de su sistema (tanto técnicas como no-técnicas -robos principalmente-), además de que en la mayoría de los casos en que se han implantado programas de este tipo, dichas corporaciones han recibido importantes beneficios económicos de parte de los gobiernos, a lo que hay que sumar que muchas de las firmas oferentes de estos servicios de UEAE provienen o están asociadas con las propias sociedades de abastecimiento.³² Por el lado de los consumidores, se aprovecha la relación de las corporaciones con los usuarios, a los que se les

³² Cabe citar aquí los beneficios logrados en el estado de California, EU, a partir de la aplicación de su programa de EE, como respuesta a la crisis eléctrica que experimentó en 2001: redujo en 5% la demanda durante el primer año y se estima que la continuidad del programa evitará 5.9 GW de potencia y una ganancia neta del orden de 12 mil-millones de dólares en la siguiente década e igual monto en términos ambientales.

informa sobre este tema y se les financia la adquisición o remplazo de equipos que les permitan un ahorro sustancial en sus pagos por electricidad, derivado de un menor consumo por el incremento de la eficiencia.

De aquí que hayan surgido igualmente conceptos como “Central Eficiente” (*“Efficiency Utility”*), “Central Virtual” (*“Virtual Power Plant”*) y el “Negawatt”, que alude no sólo a las propias acciones que realizan las empresas suministradoras, sino también a las que promueven el UAEAE entre sus consumidores. En conjunto, oferentes y consumidores de energía están logrando beneficios económicos; unos reflejado en sus facturas, otros en la reducción de inversiones en un entorno de financiamiento caro y escaso; igualmente, abate costos favoreciendo el desarrollo económico, aumenta la competitividad de las empresas, disminuye emisiones contaminantes y de gases efecto invernadero, y mejora las condiciones de trabajo.

También se debe destacar dos conceptos importantes que se desarrollaron de manera intensa desde finales del siglo pasado y al inicio de esta década, la generación múltiple y la generación distribuida. En estas acciones la idea es que los usuarios pasen de la acción pasiva de solamente ser consumidores de energía a la acción de ser también productores de energía útil, ya sea a través de la producción de sus propios energéticos secundarios, como la electricidad y el calor de proceso, desde el nivel industrial hasta el residencial hasta el caso de los grandes usuarios en el nivel industrial donde se desarrollan procesos de generación múltiple, calor de proceso a diferentes temperaturas, electricidad, refrigeración etc. En este concepto, el de generación múltiple, se unen de manera importante tecnologías diversas, tanto, las que usan energéticos convencionales no renovables, principalmente hidrocarburos, hasta nuevas tecnologías que utilizan energías renovables, desde el uso de la energía solar en su parte térmica y eléctrica, como en el desarrollo de biocombustibles para el transporte. Así es de esperarse que el mundo vaya girando de manera importante hacia la disminución de los grandes sistemas de generación centralizados, principalmente los eléctricos, al desarrollo de sistemas de generación dispersos o descentralizados, tanto de pequeña escala como de media y gran escala, que implicarán cambios importantes en los actuales esquemas de la gestión energética, tanto en los esquemas de distribución de los energéticos secundarios a través de las redes eléctricas o de los esquemas de distribución

de los combustibles para el transporte y desde luego pasando por los esquemas tarifarios y de normatividad. En este nuevo esquema el ahorro de energía y la eficiencia energética deben ir avanzando en forma paralela para evitar seguir desarrollando tecnologías ineficientes y buscando tecnologías de alta eficiencia energética y que además, como en el caso del transporte, puedan utilizar energéticos de origen diverso, como combustibles de origen fósil o de origen renovable.

Situación en México

El tema de UEAE llegó al país, podría decirse, casi simultáneamente que al resto del mundo. En 1975, dentro de la entonces Comisión de Energéticos de la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial (SEPAFIN), se inicia el estudio y la difusión de medidas de uso racional en la industria y el comercio. Al igual de lo que sucedió a nivel internacional, el petróleo fue causa de freno de estas acciones, aunque en México por la creencia de que la alta disponibilidad de este energético se contraponía con los criterios del UEAE.

No resurge sino hasta finales de los 1980s, con la creación de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), que entre sus primeros trabajos -realizados en el marco de cooperación con la Comisión Europea-, estuvo el diagnóstico de las ramas industriales y energéticas más intensivas en energía. En ese mismo año se consolida como organismo independiente el PAESE (Programa de Ahorro de Energía en el Sector Eléctrico, originado al interior de la CFE como PRONURE: Programa Nacional de Uso Racional de la Energía Eléctrica) y en 1990 se crea el FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica). Todos estos organismos tenían y tienen como misión promover el UEAE en los diferentes sectores consumidores.

Durante esta larga trayectoria institucional se han hecho importantes logros, entre los que destacan el Horario de Verano; las normas técnicas;³³ inmuebles de la administración pública (dirigido esencialmente a iluminación); progra-

³³ Las cuales prohíben comercializar equipos o sistemas que no cumplan con los niveles de eficiencia energética definidos por estas normas, de las que existen un total de 20: 15 eléctricas y 5 térmicas, mismas que han explotado los principales ahorros potenciales: refrigeradores-congeladores domésticos y comerciales, motores, sistemas de aire acondicionado, calentadores de agua y aislamiento térmico industrial.

mas institucionales (CFE, PEMEX, LFC), sectoriales específicos (industria, doméstico, transporte, agropecuario) y estatales-municipales (iluminación pública y bombeo entre los principales). Todas estas acciones se han realizado en cooperación inter-institucional o dentro de cada entidad abocada al UEAE y han recurrido a diversos mecanismos: información, capacitación, asistencia técnica, financiamiento (desde diagnósticos hasta adquisición de equipos eficientes), normalización y reconocimientos (Premio Nacional de Ahorro de Energía Eléctrica).

La situación actual es que en todas estas instituciones se han venido incorporado nuevos criterios asociados al UEAE, como son los de transición energética (diversificación de la matriz de oferta), dentro de este tema el fomento a las energías alternativas, en particular las renovables, y los aspectos ambientales, incluyendo el cambio climático, así como la seguridad energética.

Igualmente, se cuenta con nuevas leyes y disposiciones vinculadas a estas,³⁴ con las cuales se busca reforzar las atribuciones y acciones que realizan la SENER-CONUUE-CRE, de promoción del UEAE y como parte de esto, de la obligatoriedad que marcan las normas existentes en esta materia. En estos ordenamientos se integra los conceptos de uso sostenible de la energía y se presentan los mecanismos para el logro de tales objetivos.

El sector de las edificaciones

El sector de las edificaciones, también denominado en el Balance Nacional de Energía como residencial, comercial y de servicio público, ha sido un sector con una crecimiento dinámico muy importante en la última década y los desafíos que se presentan en las edificaciones son disminuir la demanda de energía fósil convencional, reducir los impactos ambientales y mantener condiciones interiores confortables frente al aumento o disminución de la temperatura exterior. Así, el proceso de diseño de las edificaciones debe ser modificado para incorporar el concepto de hábitat sustentable con una preocupación de

³⁴ Decreto de Ley para el aprovechamiento sustentable de la energía y el Anteproyecto de su Reglamento. Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética.

hacer el mejor uso posible de los energéticos renovables y no renovables, de incorporar sistemas y tecnologías eficientes ante un escenario de escasez de agua y con el propósito de mantener al interior y exterior de las edificaciones la mejor calidad de vida posible.

En función del panorama planteado es necesario introducir nuevos paradigmas en la relación entre las edificaciones y el ambiente en la próxima década. Estos nuevos paradigmas de la Arquitectura deben basarse en:

- Nuevos lineamientos para el diseño de edificaciones.
- Nuevas metodologías constructivas.
- Desarrollo de nuevas tecnologías de componentes de envolventes integradas al diseño de las edificaciones (nuevos materiales con capacidad reciclable y no contaminante, y tecnologías avanzadas de vidrios, etc.).
- Desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica y térmica utilizando la propia envolvente de la edificación.
- Desarrollo de sistemas y de tecnologías que permitan el uso óptimo del agua, desde su captación, su uso y hasta su reuso.
- Normatividades que determinen la calidad energética y nivel de emisiones de la edificación.
- Lineamientos para Edificaciones Bioclimáticas

El estado actual de la ciencia y el desarrollo tecnológico esta en condiciones de resolver un gran número de problemas que pueden permitir una adecuación eficaz de la edificación al clima. Existe mejor conocimiento de la climatología, se dispone de gran diversidad de materiales de construcción y se conocen sus propiedades estructurales y térmicas. En este siglo será necesario contar con nuevos lineamientos que ayuden al mejor diseño de las edificaciones desde el punto de vista bioclimático, los cuales pueden ser:

Al diseñar una edificación es necesario considerar que la tierra es valiosa, no solo desde el punto de vista monetario sino medioambiental. Las edificaciones en el sitio que se construyan deberán producir un mínimo de

modificaciones en el sitio, prevenir la erosión del suelo, teniendo un mínimo de áreas pavimentadas.

Dentro de lo posible, la edificación deberá de disponer de medidas propias contra las condiciones hostiles y poder conseguir una situación de confort ambiental que reduzca al mínimo las necesidades de calefacción y refrigeración adicional.

La edificación no deberá privar al usuario de las influencias exteriores naturales y ventajosas para él. Dar preferencia en la medida de lo posible a la luz y ventilación naturales.

La edificación deberá tener la capacidad técnica de abastecerse y almacenar energía de fuentes naturales para poder usarla según sus necesidades. Favorecer la proyección de edificaciones con demandas energéticas menores.

Las edificaciones deberán estar integradas ecológicamente en su correspondiente entorno. No solo han de reducir al mínimo su consumo energético interno, sino que, además, no deberán ejercer ninguna influencia negativa sobre el medio ambiente. Integrar soluciones para la captación y uso inteligente del agua, evitando cualquier desperdicio.

En la actualidad, las edificaciones que se construyen en climas extremos tienen necesariamente que recurrir a la utilización del aislamiento térmico en toda su envolvente utilizando materiales diversos de baja conductancia térmica. Se puede emplear adobe como material de construcción en lugares donde sea posible utilizarlo o bien recurrir a los aislamientos térmicos a base de espumas o de fibra de vidrio, que no hacen otra cosas que la de introducir aire en forma empaquetada en techos y paredes para aislarlos. Es importante reconocer que en la actualidad esta vieja práctica de aislar térmicamente una edificación para bajar las cargas térmicas casi se ha olvidado y es muy común ver como edificaciones nuevas, de todos los tamaños, construidas en climas cálidos no se diseñan con el aislamiento térmico adecuado en techos, muros y ventanas y por lo mismo empleando sistemas mecánicos de acondicionamiento de aire de gran capacidad, haciendo gran dispendio de la energía eléctrica.

Por lo tanto, es urgente que se retome el camino ya andado en las décadas de los años 70's y 80's donde se lograron avances muy importantes en cuanto a programas exitosos de ahorro y de uso eficiente de energía a nivel

nacional, pero que han sido casi abandonados en la última década, sin mediar justificación alguna, otra que no sea la soberbia para desafiar nuevamente a las fuerzas de la naturaleza. En este sentido, nuestro país sigue careciendo de normatividades estrictas que eviten estos excesos, y es inaplazable, que nosotros como sociedad educada sigamos permaneciendo estáticos ante estos hechos, que no solo desafían las leyes de la naturaleza sino que provocan un fuerte discomfort higrotérmico y psicológico en las edificaciones, además de un dispendio inaceptable de recursos económicos y energéticos.

Sobre este punto se destaca el problema existente en México en cuanto al desarrollo masivo de la vivienda de interés social con programas muy agresivos por parte de organismos como INFONAVIT y FOVISSSTE, así como por parte de empresas privadas que han visto en este sector una oportunidad de negocios de grandes dimensiones. Es fácil ver, que en este sector es el que mas descuido y atraso presenta en cuanto a incorporar tecnologías constructivas de bajo costo pero de buen desempeño térmico, y de utilizar tecnologías de ahorro y de uso eficiente de energía en su interior. Los modelos de viviendas que se diseñan para climas templados se reproducen tal cual en climas extremos con las graves consecuencias para los usuarios, no solo en cuanto al daño de su patrimonio económico, sino en toda una serie de afectaciones a su salud, sobre todo en las poblaciones de mayor riesgo, como la infantil y la de adultos mayores.

En programas gubernamentales de construcción masiva de viviendas de interés social los ahorros económicos mal entendidos, en cuanto a descuidar el aspecto de un diseño térmico inteligente y de costo moderado, pero con buen confort térmico, se pagan en el futuro con consecuencias para toda la sociedad, como por ejemplo el robo de la energía eléctrica o el uso de tecnologías de acondicionamiento tremendamente obsoletas y de alto consumo energético que finalmente provocan la creación de una serie de subsidios en las tarifas energéticas que pesan cada vez más sobre las débiles finanzas públicas. También el mal y escaso diseño de los espacios habitables se pagan con el incremento en la delincuencia y de bajo rendimiento escolar de las poblaciones de niños y jóvenes, así como en problemas de salud pública que tarde o temprano presionan, a su vez, a los sistemas estatales y federales de salud. Por estas razones es de gran importancia buscar mejorar todos los siste-

mas constructivos, principiando por realizar diseños bioclimáticos apegados al ambiente natural de las edificaciones.

b) Nuevas Metodologías

Para lograr edificaciones integradas al clima, sin excepción, todas las nuevas metodologías de diseño deben comprender los siguientes puntos principales:

- Recolección y procesamiento de datos meteorológicos confiables para definir las condiciones típicas de clima del lugar.
- Definición de las condiciones deseables de confort, considerando la temperatura, humedad, movimiento del aire y temperatura media radiante según el nivel de actividad física y las características de la indumentaria.
- Utilización de modelos de la intensidad de radiación solar media y máxima sobre superficies según inclinación y orientación, de acuerdo con la latitud.
- Utilización de modelos para simular el comportamiento higrotérmico de la envolvente de las edificaciones en régimen periódico permitiendo evaluar la evolución de las temperaturas interiores o cuantificar la demanda de energía auxiliar.
- Determinación de figuras de mérito que permitan medir la sustentabilidad energética de las edificaciones, para saber hasta que punto una edificación puede ser autosuficiente energéticamente, empleando tecnologías que sean viables técnica y económicamente.

c) Tecnologías Emergentes

Las tecnologías emergentes que podrán contribuir al mejoramiento de la edificación son:

- Desarrollo de nuevos materiales para la envolvente de la edificación, de bajo impacto y reciclable que se integren al medio ambiente. Reaprovechamiento de materia prima regional.

- Innovadoras técnicas de ventilación que integren el interior con el exterior, tales como las chimeneas solares, torres de enfriamiento, etc.
- Innovadoras envolventes de edificios con control de flujos de calor por medios pasivos, reflectivos, resistivos y aislamiento capacitivo, así como absorancias y emitancias de superficies. Desarrollo de nuevas ventanas avanzadas que controlen la entrada de energía térmica y luz solar. Transmisión de luz por aberturas, tamaño, orientación, mecanismos de aberturas, calidad de vidrios y sombreados de ventanas.
- Integración de tecnologías renovables en la envolvente de las edificaciones para generar energía térmica y eléctrica.
- Desarrollo de nuevos sistemas para promover el uso racional del agua, del reciclaje, de la recolección de agua de lluvia y/o reposición de agua subterránea.
- Utilización productiva de las techumbres como elementos de control térmico y de captación de agua de lluvia y de producción de alimentos, de plantas, etc.

d) Normatividad

Los requerimientos de normatividad introducirán la implementación y verificación de medidas de sustentabilidad en las edificaciones. La normatividad comprenderá:

- Evaluación termo-energética de envolventes de las edificaciones.
- Evaluación de técnicas para el acondicionamiento ambiental minimizando los requerimientos de calentamiento y enfriamiento.
- Criterios y métodos de calificación que promueva una edificación de menor impacto ambiental y mejor calidad contemplando las características específicas de la región.
- Evaluación y calificación de la vivienda.

- Criterios para el uso racional del agua, incluyendo procesos de reciclaje, disminución de descargas, recolección de agua de lluvia y/o reposición de agua subterránea.
- Criterios para privilegiar la iluminación natural, tanto en intensidad como en calidad.
- Criterios para determinar el grado de autosuficiencia energética que pueda tener una edificación, tanto en el aspecto eléctrico como térmico y de utilización obligatoria de fuentes renovables de energía.

Este enfoque de edificaciones bioclimáticas deberá conducir a una revolución en la Arquitectura y para lograrlo será necesario comenzar con el entendimiento de que cada trabajo arquitectónico tiene impactos a nivel global. Será necesario educar con los principios necesarios para efectuar este cambio en las emisiones y en los patrones de consumo en el sector de la edificación. Las instituciones educativas del país tienen el potencial para introducir los cambios profundos en la profesión, los cuales podrán cambiar la dirección de la Ingeniería de la Construcción y la Arquitectura. Se deberán ofrecer herramientas de cómputo y de la vida real para proporcionar información a los estudiantes sobre los principios fundamentales de los procesos naturales. Acoplado con el nuevo proceso educativo, deberá existir entrenamiento dirigido a nivel profesional para modificar la visión y ser más concientes del cuidado al medio ambiente [8,9].

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

De acuerdo con lo antes descrito, hay un importante avance en materia del UAE en el país y las recientes disposiciones normativas tienden a enfatizar la importancia de este tema. Los lineamientos cualitativos y algunos cuantitativos (v.g. asignación de presupuesto en 2009) ya se han definido y será en el siguiente año cuando se conozcan los resultados de estos esfuerzos.

En el ínterin, procede repasar algunos elementos aún carentes en la estrategia actual del UAE en México:

- Persiste aún una política de subsidios en el costo de algunos energéticos que impactan negativamente en programas de UEAE.
- Hay insuficiente información estadística sobre el consumo energético por sectores y la existente es poco confiable: patrones de consumo e intensidades.
- Es difícil, por lo anterior, distinguir las causas del descenso, en el tiempo, de la intensidad energética respecto del PIB: por descenso de la actividad económica o por mejoras reales en el consumo de energía.
- Inexistencia de información en cuanto a estándares internacionales que permitan a la industria manufacturera tenerlos como referencia en aras de mejorar su competitividad.
- Está ausente todavía una normatividad en las metodologías para realizar diagnósticos confiables de los usos de la energía.
- Hay poca información específica y certificada acerca de materiales y equipos que promuevan el uso eficiente de la energía.
- Hay muy pocos laboratorios de pruebas y certificación para la medición de propiedades físicas de sistemas y equipos para el ahorro de energía.
- Es escaso el desarrollo tecnológico para producir equipos de alta eficiencia adaptados a las condiciones de operación en México (v.g. en consideración de la región).
- Falta dinamismo en la emisión de normas, al menos para cubrir todos los equipos electrodomésticos y electrónicos de más uso, en espera de abarcar el mayor número de sectores.
- Falta normatividad para los sistemas y equipos importados.
- Existe poca vinculación entre gobierno-academia-industria que permita aprovechar las sinergias que dan las capacidades de cada uno de estos sectores en materia de UEAE.
- Está ausente la definición de prioridades en la estrategia gubernamental de UEAE, lo que lleva a una asignación de recursos poco óptima.

- Es escaso el seguimiento y por lo tanto también la difusión de los resultados obtenidos por los programas de UEAE a lo largo del tiempo, con lo que se resta motivaciones y no se aprovecha el potencial efecto multiplicador.
- Hay insuficientes profesionales especializados en las áreas del UEAE.
- Hace falta reforzar los encuentros profesionales interdisciplinarios en materia del UEAE: congresos, mesas de trabajo, vinculación con cámaras empresariales, etc.
- Está ausente la obligatoriedad de aplicar medidas del UEAE en el sector público, en los tres niveles de gobierno.

Energía del hidrógeno

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

El hidrógeno como combustible ha recibido una gran atención en los últimos años, debido a sus características favorables en términos del carácter sustentable que significa su obtención y su uso, incluyendo a partir de energías renovables y una infinidad de materias primas también renovables. Ya que no existe libre en la naturaleza, su obtención al igual que el petróleo y los productos refinados de éste (e.g. gasolinas, GLP, etc.), requiere inversión de recursos. Su alto contenido energético por unidad de masa (120MJ/Kg, el más alto de los combustibles conocidos) lo hacen muy atractivo. Adicionalmente, su uso para generación de electricidad en dispositivos de conversión de energía como las celdas de combustible, permiten un mejor aprovechamiento del contenido energético, debido a la alta eficiencia de conversión (40%-75% según tipo de celda). Por si esto fuera poco, cuando el hidrógeno es empleado como combustible para generar electricidad (la forma más práctica de utilizar la energía), las emisiones son exclusivamente vapor de agua y calor, un subproducto susceptible de aprovecharse para incrementar aún más la eficiencia del uso de hidrógeno como combustible. Por todo lo anterior el hidrógeno, así como su alta compatibilidad con energías e insumos renovables, es hoy en día un candidato muy atractivo para sistemas energéticos eficientes, limpios y sustentables.

Producción de hidrógeno

El hidrógeno puede ser producido a través de una gran variedad de tecnologías, las cuales en general podrían agruparse en dos principales categorías; las basadas en insumos de hidrocarburos (fósiles ó no fósiles) y las basadas en fuentes energéticas renovables.

Basada en hidrocarburos

Las tecnologías basadas en hidrocarburos para la producción de hidrógeno dominan el mercado industrial con un estimado del 97% ó más. Cerca de tres cuartas partes del hidrógeno industrial producido en el mundo se obtiene del metano contenido en el gas natural, haciéndolo reaccionar con vapor de agua a 750 °C, en presencia de un catalizador de níquel. Otro 25% se fabrica con métodos similares, a partir de gases procedentes del refinado del petróleo o del carbón, sin embargo metano proveniente de otras fuentes (e.g. renovables) es susceptible de transformarse en H_2 .

Reformación catalítica. Este es un proceso catalítico que involucra la reacción ya sea de metano del gas natural o de otros hidrocarburos ligeros para generar una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. La mezcla es entonces separada para producir hidrógeno de alta pureza. Este método es la tecnología más eficiente y se encuentra disponible comercialmente, además puede ser aplicado para grandes cargas con un costo de producción accesible, por lo que se espera ayude en la transición hacia un amplio uso de H_2 .

Oxidación parcial. Este proceso involucra la reacción de un combustible fósil con un limitado suministro de oxígeno para producir una mezcla rica en hidrógeno, el cual es posteriormente purificado. La oxidación parcial puede ser aplicada a una gran cantidad de hidrocarburos, incluyendo gas natural (i.e. metano), crudo pesado, biomasa sólida y carbón. Sus productos principales son hidrógeno y monóxido de carbono, el cual también puede usarse como combustible en celdas de combustible de alta temperatura.

Gasificación. Este proceso consiste principalmente en hacer reaccionar oxígeno y carbón mineral, coque ó incluso biomasa, para obtener una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, además de ciertas impurezas presentes.

Posteriormente mediante un proceso de purificación es posible obtener hidrógeno altamente puro.

En general, la producción de H_2 vía transformación de hidrocarburos está asociado a la producción de CO_2 . A pesar de ello, cuando el hidrocarburo es de origen fósil, el uso de éste en celdas de combustible le infiere ventajas debido a la eficiencia de producción de electricidad (i.e. menos emisiones por kWh generado comparado con la combustión del combustible original). Cuando el hidrocarburo proviene de biomasa el sistema puede presentar alta sustentabilidad.

Producción de H_2 con fuentes renovables

Existen diferentes métodos de producción de hidrógeno sin la utilización de hidrocarburos (siendo el más comercial la electrólisis del agua), los cuales van ganando importancia en el mundo debido a las mínimas emisiones de contaminantes.

Electrólisis. Usando energía eléctrica proveniente ya sea de una central nuclear, solar, eólica ó geotérmica, la electricidad es suministrada a un electrolizador para extraer el hidrógeno del agua, descomponiéndola en oxígeno e hidrógeno. Este método no es muy eficiente actualmente en relación al costo-beneficio (técnicamente sí lo es), en comparación con reformación de metano, pero puede permitir la generación del hidrógeno mediante energía eléctrica proveniente de fuentes renovables. Este método está ampliamente desarrollado.

Fotoconversión. Por este método, se utilizan organismos biológicos (bacterias o algas) ó semiconductores que absorben luz solar, descomponen el agua y producen hidrógeno. A través de sus funciones metabólicas normales algunos organismos biológicos producen naturalmente hidrógeno; los semiconductores producen hidrógeno mediante la generación de una corriente eléctrica que descompone el agua.

Termoquímica. Este método utiliza calor para producir hidrógeno a partir de la biomasa y desechos sólidos. Una tecnología a partir de pirólisis usa calor para licuar biomasa. Se usa vapor para producir hidrógeno a partir del biocombustible resultante, en un proceso conocido como reformado de vapor.

Existen también los ciclos termoquímicos en donde el calor de proceso es aprovechado para generar un producto (p.ej. un metal), el cual asiste posteriormente para generar hidrógeno.

Proceso termoquímico de agua. Este proceso usa reactivos químicos tales como bromuros o yoduros, asistidos por calor. Esto causa que la molécula de agua se descomponga. Este proceso toma lugar en varias etapas (usualmente tres) para completar el proceso total.

Procesos fotoelectroquímicos. Este proceso usa dos tipos de sistema electroquímicos. Uno usa complejos metálicos solubles como catalizadores, mientras que el otro usa superficies semiconductoras. Cuando el complejo metálico se solubiliza, el complejo absorbe energía solar y produce una carga eléctrica que conduce a la reacción de descomposición del agua. Este proceso imita a la fotosíntesis.

Así, existe una gran variedad de métodos por los cuales se puede producir hidrógeno. La elección individual o combinación de los mismos dependerá del costo/beneficio. Su compatibilidad en la mayoría de los casos con tecnologías de energía renovable hace del H_2 un elemento flexible y conveniente para integrar sistemas energéticos sustentables y 100% renovables.

Almacenamiento y distribución de hidrógeno

El almacenamiento del hidrógeno es posible en forma sólida, líquida y como gas comprimido. Los dos últimos posibles técnicamente, aunque es el gas comprimido el más comercial (presiones entre 200 y 300bar). H_2 líquido requiere altísimas presiones y temperaturas criogénicas (enfriado con nitrógeno líquido). Junto con el almacenamiento, la distribución de este combustible son grandes retos por resolver. La difícil compresibilidad del gas y su alta fugacidad, son factores importantes que mantienen la investigación y el desarrollo en áreas como: mejorar sistemas convencionales de almacenamiento de hidrógeno (gas y líquido) con el propósito de aumentar la cantidad de energía almacenada ó disminuir la energía utilizada para el proceso de almacenamiento. El almacenamiento de hidrógeno en forma sólida se consigue cuando el gas se absorbe en metales ú otros materiales como carbón (nanotubos, etc.) ó bien en microesferas de vidrio. Estos medios también están siendo estudia-

dos y requieren mayor desarrollo. La evaluación de sistemas convencionales para la distribución de hidrógeno, nuevos y eficientes medios de distribución de hidrógeno por medio de ductos que no sufran fragilización por hidrógeno, son también retos en estudio.

Aunque el hidrógeno comprimido es el más comercial, la densidad másica transportada es muy baja. Es decir, se transporta en promedio 1Kg en 11 m³ de hidrógeno gaseoso a alta presión por cada 140Kg de envase (acero). Será necesario que la investigación en este rubro se torne hacia el uso eficiente de la combinación química del H₂ o su absorción en sustratos superficiales que a la fecha presentan bajos ciclos de vida (10-30 ciclos), comparada con procesos de alta presión (i.e. hidruros) que pueden llegar a 4,000-5,000 Ciclos .

Aplicación de hidrógeno

Las aplicaciones del hidrógeno como combustible se encuentran principalmente en la generación de energía eléctrica a través del uso de celdas de combustible. La combustión de H₂ también se ha considerado (aunque en mucho menor grado) para transporte y generación de electricidad). Las áreas de oportunidad en donde es posible plantear proyectos de investigación y desarrollo a corto plazo son: Investigación y desarrollo de celdas de combustibles de baja, mediana y alta temperatura empleando hidrógeno y otros combustible aprovechando la alta eficiencia de conversión de energía, evaluación de las posibles aplicaciones de hidrógeno como combustible alternativo y limpio en sistema de combustión interna, a pesar de ser la combustión menos eficiente que su conversión electroquímica vía celdas de combustible.

Celdas de combustible

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos de conversión de energía muy parecidos a las baterías. La posibilidad de mantener su operación de manera continua en tanto se alimente un combustible (i.e. hidrógeno), aunado a la alta eficiencia de conversión de energía química contenida en el combustible a energía eléctrica, son los mayores atractivos de este tipo de tecnología. Existen varios tipos de celdas de combustible cuyos nom-

bres dependen del material utilizado como electrolito: celdas de membrana (PEMFC), de ácido fosfórico (PAFC), de óxidos sólidos (SOFC), de carbonatos fundidos (MCFC) y alcalinas (AFC). Todas ellas comparten el mismo principio básico de operación pero son tecnologías muy distintas entre sí. Ningún tipo de celda está disponible comercialmente, considerando que la característica de comercialidad está asociada al volumen de producción masivo (miles de unidades) y costos competitivos. Sin embargo, es posible conseguir algún producto para su uso en proyectos demostrativos. El desarrollo tecnológico más avanzado es aquel de las celdas de combustible de membrana, debido a su conveniente aplicación en transporte, sector que viene invirtiendo millones de euros cada año en desarrollar sistemas de tracción eléctrica basados en este tipo de celdas. Las celdas de carbonatos fundidos han despuntado recientemente en aplicaciones estacionarias. Este tipo de celdas opera a temperaturas relativamente elevadas que permiten alimentar combustibles como el metano proveniente de procesos de descomposición de biomasa y están siendo demostradas en lugares que disponen de metano como subproducto, lo cual las ha hecho muy atractivas y convenientes. Otros tipos de celdas de combustible han tenido dificultades para un mayor desarrollo debido a diversos retos como sus altas temperaturas de operación, i.e. complejidad de sistemas y compatibilidad requerida de los materiales empleados, como es el caso de las celdas SOFC. Las celdas AFC y las PAFC han perdido interés debido a la necesidad de combustibles muy puros en el primer caso y los altos costos de producción en el caso de las PAFC. En general, los retos aún existentes que deben ser superados para hacer de esta tecnología una opción masiva para generación de electricidad, están asociados a la durabilidad requerida (5000h para aplicaciones móviles y de 20-40 mil para estacionarias), lo que ha limitado su aplicación a usos como sistemas de respaldo (sector comercial en desarrollo). Por otra parte los altos costos de estas tecnologías debidos principalmente a componentes como membranas, catalizadores y placas bipolares, se mantienen como retos que sólo podrán ser superados mediante el desarrollo de nuevos materiales ó nuevas técnicas de manufactura. Por otra parte, las apenas nacientes técnicas de manufactura para estas tecnologías y la falta de componentes auxiliares específicos para sistemas basados en celdas de combustible (compresores, válvulas,

humidificadores, etc.) no han facilitado la disponibilidad de estas tecnologías comercialmente. Sin embargo, alrededor del mundo se viene invirtiendo fuertemente no sólo en ciencia aplicada, sino principalmente en ingeniería que encuentre respuestas a los retos impuestos por la complejidad de los sistemas basados en celdas de combustible, tales como manejo de agua (i.e. PEMFC) y manejo de calor (i.e. SOFC), ingeniería de procesos, control, electrónica de potencia, entre otros.

Infraestructura

El tema de infraestructura es muy importante a diferentes niveles de implementación de la tecnología de hidrógeno. Se requiere atención en el desarrollo de la infraestructura en investigación básica y aplicada, proyectos demostrativos a escala real, plantas de generación y almacenamiento, distribución local e interconectada a la red de distribución, adecuación de la infraestructura existente, mejorar la vía de transporte para aplicaciones móviles, etc. Fragilización del acero por hidrógeno de tuberías y compresión del gas son temas que permanecen como principales retos técnicos.

Normas y estándares en el manejo de H_2

La utilización de hidrógeno para la producción de energía eléctrica, requiere de especificaciones que garanticen su seguridad en el manejo y uso. El desarrollo de normas y estándares o la implementación de las que se encuentran vigentes en otros países, así como la certificación en el manejo de materiales y sistemas, representan barreras institucionales para la pronta utilización de este combustible que deberán ser superadas.

Situación en México

En el país la mayor parte de las actividades de investigación y desarrollo son realizadas en instituciones académicas y de investigación, mediante recursos propios ó a través de proyectos tipo CONACYT. Existe cada vez más interés por realizar I&D en temas asociados al hidrógeno, desde su producción

hasta su uso final en dispositivos de celdas de combustible y en ocasiones para combustión de este gas. Instituciones dedicadas a ello incluyen entre otros al IPN (CINVESTAV, ESIME), al Instituto de Investigaciones Eléctricas, al ININ e IMP, algunos centros CONACYT (CIDETEQ, CICY, CIMAV y otros), UNAM (los Institutos de Materiales, el de Biotecnología y el de Ingeniería, así como la Facultad de Química e Ingeniería), otras Universidades Estatales (UAEP, Q.Roo, UAEMor, UAEMex, UAZ), instituciones tecnológicas (CENIDET, ITCancún, UAEZ, ITO), otras universidades privadas (UAM, ITESM). A pesar del creciente interés, la infraestructura para la I&D de tecnologías del hidrógeno en México es muy limitada, al igual que la disponibilidad del recurso humano disponible para ello.

Las actividades científicas (i.e. ciencia aplicada) mayoritariamente están dirigidas al desarrollo de nuevos materiales en particular catalizadores y componentes de sistemas (semiconductores, óxidos, calcogenuros, metálicos, cerámicos, nanoestructuras de carbón, entre otros). Esto es cierto tanto para hidrógeno producido a partir de energía e insumos renovables, como a partir de otras fuentes y para sistemas de celdas de combustible. La actividad en materia de ingeniería es mucho más limitada. CINVESTAV realiza prototipos para divulgación de celdas de combustible. El IIE realiza desarrollo de tecnología, particularmente en celdas de combustible y generación de hidrógeno renovable. CENIDET trabaja en electrónica de potencia para celdas de combustible. En materia de ingeniería el CIE también incursiona en la generación de hidrógeno renovable. Algunos proyectos aislados (IIE, CIE-UNAM) ó en colaboración se han propuesto para estudios de sistemas hidrógeno-solar-celda de combustible a un nivel demostrativo escala real ó en escala laboratorio. Los medios de producción estudiados en México son principalmente mediante la reformación de metano ó gas natural (IMP, CINVESTAV, CIMAV), reformación de combustibles líquidos (UAM-A, CIE), electrólisis (IIE, CIDETEQ, CIE, CINVESTAV, ININ), fotoelectrólisis (CIE). En almacenamiento destaca el trabajo del IPN y del ININ mediante hidruros metálicos. Las aplicaciones de mayor interés en México han sido en celdas de combustible de membrana ó celdas tipo PEM (CINVESTAV, IIE, UAP, CIE, CIDETEQ y otros), celdas de óxidos sólidos ó tipo SOFC (IIM-UAM) y celdas de carbonatos fundidos (UAEMor, UAEZ).

Cabe destacar que estas iniciativas han sido generalmente individuales con limitada colaboración y por lo tanto escasa coordinación, debido a la falta de un programa nacional de hidrógeno, así como de recursos. Sin embargo, existen comunidades con interés común de impulsar el uso del hidrógeno, destacando la Sociedad Mexicana del Hidrógeno (SMH₂) con casi 10 años de actividades ininterrumpidas, las que han incluido congresos técnicos, foros de discusión, visitas industriales y cursos de tecnologías del hidrógeno para la formación de recursos humanos. La participación de algunas industrias privadas ha sido limitada prácticamente a aquellas dedicadas a la comercialización de este gas (i.e. Linde, Praxair, Cryoinfra) y otras asociadas al ramo (TotalEnergy).

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

En México existe una comunidad extensa y organizada que realiza desde hace varios años investigación y desarrollo en temas asociados al hidrógeno. Por ello se propone que para promover la generación de oportunidades más tangibles en este tema, se desarrollen proyectos en tres niveles importantes: proyectos de ciencia aplicada, proyectos para el desarrollo de prototipos y finalmente proyectos para la integración de sistemas.

Línea 1.-Desarrollo de proyectos de ciencia aplicada particularmente para el desarrollo de materiales y componentes para tecnologías de hidrógeno (producción, almacenamiento y usos finales)

Una vez diagnosticado el potencial científico y tecnológico de los grupos de investigación involucrados (recursos humanos, infraestructura), se definen líneas estratégicas, como:

- Síntesis de materiales de bajo costo y materiales alternativos, incluyendo electrocatalizadores, electrolitos para celdas de combustible, catalizadores para producción de hidrógeno a partir de insumos orgánicos renovables, placas bipolares.

- Formación de verdaderas redes de investigación, con el propósito de compartir conocimiento, infraestructura y experiencias.
- Se deberá buscar tanto la especialización de profesionales como la formación de nuevos recursos humanos en temas de hidrógeno.
- Se deberá promover financiamiento nacional o extranjero, impulsando la participación del sector productivo interesado en esta naciente industria.
- México debe promover el mejorar la infraestructura especializada en los diferentes centros de investigación, para hacer a los proyectos más competitivos.

Línea 2.- Desarrollo de Prototipos de dispositivos asociados a tecnologías del hidrógeno (producción, almacenamiento, celdas de combustible)

El desarrollo de prototipos tiene el objetivo de llevar a un nivel superior los desarrollos de los laboratorios mexicanos, para prueba de conceptos y particularmente para atraer a la industria. Estos prototipos comenzaran desarrollos multidisciplinarios con potenciales aplicaciones en mente, manteniendo la investigación básica bien aplicada.

a) Prototipos de Celdas de Combustible: La integración de prototipos de celdas de combustible (particularmente PEM, DAFC, MCFC y SOFC) como plantas generadoras de electricidad a partir de proyectos de aplicación específica, deberán desarrollarse para promover la creación de tecnología primaria (Core Technology) y propiedad intelectual (patentes).

Esta tecnología promoverá el desarrollo de tecnología en los diferentes niveles tecnológicos tales como: tecnología de ensambles (celdas electroquímicas), conjuntos de celdas (ó stacks de mayor voltaje), así como filosofías de operación para aplicaciones específicas (de baja a mediana potencia considerando el estado de desarrollo actual de esta tecnología). Estas actividades deberán generar en la medida de lo posible propiedad intelectual que signifique el capital ofrecido a potenciales inversionistas.

Las aplicaciones materia de estos proyectos podrían ser acordadas previamente con potenciales inversionistas interesados en explotar la tecnología.

Prototipos de esta naturaleza permitirán especializar recursos humanos incluyendo el propio personal de investigación de la institución ejecutora a través de actividades multidisciplinarias.

Los recursos para estos prototipos podrían incluir infraestructura para la realización de diseños, tales como el maquinado por control numérico (CNC), herramientas de diseño y manufactura (CAD/CAM), herramientas para modelado y simulación de procesos y diseños para nivelar recursos minimizando experimentación. Otro tipo de financiamiento está relacionado con gasto de materiales (típicamente importados) y gasto corriente en general.

b) Desarrollo de prototipos para la producción de Hidrogeno (principalmente Electrolisis PE y SO, reformación incluyendo biomasa/biogás/biocombustibles en combinación con fuente térmicas como la concentración solar y finalmente fotoelectrólisis (diseño de celdas).

¿Cómo desarrollarlo?: A través de proyectos que utilicen el estado del arte de las diferentes tecnologías (en muchos casos ya desarrolladas por algunos grupos). Estos proyectos deberán de realizar análisis de mercado para definir las características técnicas del prototipo para las diferentes aplicaciones (portátil, estacionario, transporte, etc).

Los proyectos deberán incluir el diseño de los prototipos a escala de laboratorio pero de fácil escalabilidad y manufactura. La construcción de prototipos deberá considerar dimensiones reales.

Los prototipos deberán tener un carácter preindustrial para su eventual transferencia tecnológica (i.e. comercialización).

¿Cómo aprovechar oportunidades, reforzar fuerzas, reducir debilidades, y eliminar amenazas? ¿Qué tenemos que hacer para conseguirlo?

A través de estos proyectos se generará mayor interés y promoverá la divulgación de estas tecnologías limpias y con potencial de alta sustentabilidad.

Estos proyectos deberán desarrollar competencias a lo largo del mismo y promoverán la creación de potenciales proveedores para la producción de componentes.

También estos proyectos promoverán la creación de laboratorios avanzados para probar y calificar los prototipos, eliminando debilidades por falta de infraestructura.

Los proyectos incluirán actividades dirigidas a desarrollar aquellas consideraciones asociadas con la seguridad de sistemas que utilicen H_2 .

c) Sistemas de Almacenamiento: Los sistemas de almacenamiento prototipo por desarrollar deberán estar dirigidos a aumentar la densidad de almacenamiento o y ciclos de carga de manera significativa tales como en sistemas de combinación química (p.ej. hidruros metálicos) ó hidrógeno absorbido en sustratos superficiales. Para el caso de la combinación química se debe promover el desarrollo de prototipos ya sea manométricos o de otro tipo, que deben cumplir con los requerimientos de densidad de almacenamiento y ciclos de carga a través de materiales disponibles o explotables en el país. El enfoque deberá ser igual con absorbente a partir de sustratos de explotación nacional.

Línea 3.- Integración de Sistemas de Energía de hidrógeno

La integración de sistemas de energía de hidrógeno que incluyan fuentes renovables de energía, deberán ser estimulados a partir de proyectos que promuevan el desarrollo de sistemas 100% sustentables. Estos proyectos aunque tipo piloto habrán de demostrar en escala real la factibilidad técnica de los sistemas y tecnologías a integrar, en aplicaciones y condiciones realistas. Estos podrán ser por ejemplo:

a) Generación eléctrica: A través de proyectos que integren sistemas energéticos basados en tecnología de H_2 , se deberá desarrollar ingeniería que incluya sistemas de generación eléctrica con celdas de combustible (generación mediante sistemas de combustión con H_2 podrían ser considerados aunque su desarrollo actual es inferior).

Estos desarrollos partirán de aquellos prototipos previamente desarrollados con el propósito de prueba de conceptos, desarrollo de sistemas demostrativos ó de sistemas precomerciales.

Estos proyectos podrían requerir financiamiento para gasto de inversión pero será preferible el empleo de componentes desarrollados en México. El

gasto de inversión que favorezca el desarrollo de infraestructura en instituciones dedicadas a estos proyectos, es necesario para fortalecer las capacidades nacionales. Otros gastos corrientes deberán ser provistos mediante el financiamiento de estos proyectos.

Estos proyectos deberán considerar la participación de estudiantes para promover la formación de recursos humanos especializados en estas tecnologías. La formación de grupos multidisciplinarios deberá ser favorecida incluyendo, sin ser restrictivo, más de una institución.

Este tipo de proyectos deben generar know-how en diferentes áreas de las ingenierías como ingeniería electroquímica, de procesos, de materiales, mecánica, de control, de electrónica de potencia, eléctrica entre otras.

b) Desarrollo de Sistemas para la Producción y Almacenamiento de hidrógeno.

Los sistemas de producción son ineficientes y dependientes de energéticos actuales, los catalizadores no son desarrollados en el país, los sistemas de control son desarrollados por extranjeros de tal manera que será necesario líneas de investigación para el desarrollo de sistemas de producción en los siguientes rubros:

Desarrollo de Catalizadores para Reformación y Micro Reformación.

Desarrollo de Absorbentes activos para el acondicionamiento o purificación de Hidrógeno.

Desarrollo de Sistemas de Control y Análisis para la Producción.

Para la integración de prototipos para proyectos demostrativos con vías a su comercialización masiva deberá favorecerse el integrar el procesamiento de insumos renovables, así como fuentes de energía calórica renovables para procesos.

c) Integración de hidrógeno con fuentes renovables de energía.

La introducción del componente hidrógeno en sistemas de fuentes renovables de energía asistirá en la generación de ingeniería de sistemas 100% renovables y sustentables agregando sistemas de almacenamiento de energía en forma de H_2 para su uso posterior cuando no se cuente con el recurso intermitente. Los sistemas futuros de energía son previstos como sistemas con más de una tecnología por lo que el manejo de energía y recurso energético es un reto técnico que requiere ser superado. Estos proyectos requieren gasto

de inversión y corriente pero significa oportunidades de desarrollo de know-how y estimulación en el uso de fuentes renovables de energía. Estos sistemas pueden aprovecharse para la formación de recursos humanos además de la formación de especialistas. Estos proyectos deberán estar encaminados a mejorar la eficiencia del sistema integrado, factor de planta y costo del producto, mediante la optimización de componentes incluyendo en la etapa del diseño, así como mediante el eficiente y óptimo manejo de la energía proveniente de diversas fuentes (filosofía de hibridación).

Energía nuclear de fisión

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

La energía nuclear se obtiene de las reacciones nucleares de fusión o fisión nuclear. En la fusión dos núcleos atómicos muy ligeros se unen (se fusionan) y en la fisión un núcleo atómico muy pesado es dividido (fisionado) cuando un neutrón con cierta energía lo golpea. En ambos procesos la masa de los reactivos es superior a la de los productos por lo que se libera una gran cantidad de energía.

Hasta ahora sólo la fisión ha sido desarrollada a nivel comercial, esencialmente para la generación de electricidad -aunque es también factible utilizarla en forma de energía mecánica (por ejemplo en aplicaciones de propulsión) o en forma de energía térmica (por ejemplo en procesos que requieren de calor como en desalación de agua y producción de hidrógeno).

La principal característica de este tipo de energía es su alta densidad energética, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa del material utilizado es muy superior al de cualquier otro tipo de fuente fósil o renovable. Su otra característica sumamente destacable es que no produce gases de efecto invernadero.

Para poder producir las reacciones de fisión y aprovechar la energía liberada se utiliza un reactor nuclear, en el que se logra mantener una reacción de fisión en cadena de manera controlada y se extrae la energía en forma útil. La tecnología de los reactores nucleares ha ido evolucionando, y actualmente están en funcionamiento mayoritariamente los reactores de la Generación II. Los de la Generación I son los primeros reactores prototipo que empezaron

a operar a finales de los años cincuenta y los sesenta. Recientemente empezaron a construirse y a entrar en operación los reactores de la Generación III, los cuales son versiones avanzadas, con mejoras tecnológicas sobre los reactores de la Generación II. A nivel de investigación y desarrollo, la comunidad internacional está trabajando en el diseño de los reactores de Generación IV. El énfasis, en estos nuevos reactores y sus ciclos de combustible, está dirigido a cumplir con los criterios de mejoramiento de la economía, la seguridad, la confiabilidad, la sustentabilidad y la no proliferación.

A raíz de los accidentes de Three Miles Island (EUA en 1979) y sobre todo de Chernobil (en la entonces Unión Soviética, en 1986), esta fuente tuvo un freno importante en su crecimiento. Sin embargo, únicamente se han tenido estos dos accidentes en más de 438 reactores comerciales en 50 años de operación comercial. Actualmente, con la necesidad imperante de combatir el cambio climático y de satisfacer la seguridad energética, la energía nuclear está volviendo al escenario, con mejoras en diversos aspectos y en particular en los relativos a la seguridad.

La energía nuclear de fisión para la producción de electricidad representa una tecnología madura, con más de 13,500 años-reactor de experiencia de operación. Participa con el 15% de la generación eléctrica mundial y cerca del 5% en México. Sus costos son competitivos con las otras tecnologías de producción eléctrica y en muchos países es la opción de más bajo costo; además de que es de las pocas tecnologías que internalizan³⁵ sus costos ambientales en el valor unitario nivelado de generación, al incluir en él las erogaciones por el tratamiento de sus residuos y el desmantelamiento de la central al término de su vida útil. Asimismo, es una de las fuentes de energía que tiene las más bajas emisiones, en la fase de generación y utilización eléctrica³⁶, con lo que se han evitado emisiones importantes de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

³⁵ Internalizar: significa que para el cálculo del costo nivelado del kWh se incluyen los costos asociados al manejo de los residuos radiactivos de bajo, medio y alto nivel, así como los relacionados con el desmantelamiento de la central cuando ésta alcance el final de su vida útil.

³⁶ No sucede así si se considera todo el ciclo del combustible, de hecho, es altamente emisor en sus fases de exploración y extracción del recurso, como en la industrial.

A nivel mundial, las condiciones ambientales actuales son favorables para la generación nuclear, lo que se ha traducido en que actualmente existan 50 reactores en construcción, que representan 45,538 MWe y 137 más ordenados o planeados, equivalente a 151,185 MWe. Observando la prospectiva de construcción de este tipo de centrales a nivel mundial, la producción y comercialización de uranio volverán a ser actividades estratégicas.

Como ya se mencionó, en el presente ya se cuenta con los reactores nucleares clasificados como avanzados o de Generación III, que entre sus características está el tener un esquema estandarizado (por tipo), reduciendo así los tiempos de construcción y de licenciamiento³⁷, y por tanto los costos de capital³⁸. Cuentan con un diseño más robusto y a la vez simplificado, haciéndolos más fáciles de operar. Su factor de disponibilidad³⁹ es más alto y su vida útil nominal es de 60 años. Los efectos en el ambiente y el volumen de los desechos radioactivos producidos son también menores con respecto a los reactores anteriores. En cuanto a los de la Generación IV, ya están en etapa de diseño seis nuevos sistemas, que incluyen los reactores nucleares y su ciclo de combustible asociado. A la mayoría de estos sistemas se asocia el ciclo de combustible cerrado, en el cual el combustible gastado se reprocesa y se recicla, de manera que los recursos energéticos (uranio y/o torio) se utilizan de una manera mucho más eficiente, y el volumen y la radiotoxicidad de los residuos de alto nivel se reducen sustancialmente. Estos reactores se desarrollan en el marco del Foro Internacional de la Generación IV (GIF), iniciado en 2000 y en el que participan 10 países y Euratom (Comunidad Europea de Energía Atómica), trabajando en lo que se consideran los sistemas del futuro, los que operarán más allá del año 2030. Cabe mencionar que México no participa en este foro.

Otra acción conjunta se tiene en el Proyecto Internacional sobre Ciclos del Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (INPRO), el cual está liderado y apoyado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Inició en 2001 con el objetivo de promover el uso seguro, sostenible, econó-

³⁷ Licenciamiento se refiere a la obtención de un permiso que otorga el órgano regulador del país; en el caso de México, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, para permitir la construcción y posteriormente la operación de la planta nucleoelectrica.

³⁸ Los costos de capital son los de la inversión necesaria para la construcción de la central.

³⁹ Disponibilidad es el tiempo anual que el reactor está en operación, entregando potencia.

mico y resistente a la proliferación de la energía nuclear y apoyar a satisfacer las necesidades energéticas del Siglo XXI. Participan 11 países y la Comisión Europea; México no está entre ellos.

Se tiene también la Iniciativa Global para la Energía Nuclear (GNEP), impulsada por los Estados Unidos de América, con el fin de promover la cooperación internacional para el desarrollo de sistemas nucleares avanzados, seguros y confiables.

En cuanto al Programa Multinacional de Evaluación de Diseños (MDEP), en él participan diez organismos reguladores, en busca de aumentar la cooperación entre ellos, que lleve a establecer prácticas regulatorias de referencia para mejorar la evaluación de los nuevos reactores nucleares.

En lo relativo a la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO), creada en 1989, mantiene sus objetivos iniciales, de promover y supervisar la seguridad de las centrales, principalmente aprovechando sus experiencias de operación y lograr así los más altos estándares de seguridad nuclear, para lo cual se han establecido calificaciones.

En 2007, en la reunión sobre Ambiente y Crecimiento Sostenible del Consejo Internacional de Academias de Ingeniería y Ciencias Tecnológicas (Council of Academies of Engineering and Technological Sciences, CAETS), una de las conclusiones a las que se llegó fue que el uso de esta fuente esta energía es clave para el crecimiento sostenible. Además, la Federación Mundial de Organizaciones de Ingeniería (World Federation of Engineering Organizations, WFEO) también se pronunció a favor de esta fuente energética. Y en 2008, la Sociedad Nuclear Mexicana cumplió 20 años de promover el desarrollo científico y tecnológico del campo nuclear en México.

Con el fin de mejorar la seguridad, la confiabilidad y el carácter sostenible de esta fuente de energía, en el presente, la I&DT se centra en tres temas dominantes:

- a) Reactores avanzados y ciclos de combustible.
- b) Tratamiento de residuos.
- c) Soporte para la operación segura de las centrales nucleares.

Estas actividades a nivel mundial las realizan académicos, institutos de investigación, autoridades reguladoras y la industria, ya sea de manera individual o en conjunto, aunque en el presente predomina la colaboración internacional.

De manera más específica, las áreas en estudio son: Ciencias Nucleares, Seguridad Nuclear, Manejo de Desechos Radiactivos, Protección Radiológica, Valoración de Impactos Ambientales, Análisis de costos de generación eléctrica y de Toma de Decisiones, Planeación Energética y Exploración y Minería de Uranio.

En el caso de las ciencias nucleares, las actividades se enfocan al desarrollo de bases de datos y su aplicación en modelos de física de reactores, de desempeño de combustible, al estudio de la factibilidad científica y tecnológica de extender el quemado del combustible (extracción de energía por unidad de masa) más allá de los niveles actuales; a la verificación y validación de programas de cómputo (software) y sus datos asociados, investigación sobre: la física del núcleo de reactores avanzados, los sistemas de fraccionamiento y transmutación, los materiales de alta temperatura, la producción nuclear de hidrógeno, etc.

A nivel internacional las principales actividades de I&D que se realizan en seguridad nuclear se enfocan a mejorar este rubro en la operación y en el desempeño de las centrales, como son: desarrollo de software para la simulación de transitorios, de accidentes y de análisis de estabilidad, así como de modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD), investigación sobre la fenomenología de accidentes en reactores avanzados, como el desempeño de combustible con altos quemados y como la incorporación del riesgo en la toma de decisiones, creando una reglamentación informada para enfocar los recursos hacia lo que más pueda mejorar la seguridad de las centrales.

En manejo de desechos radiactivos se investiga sobre el procesamiento, acondicionamiento, almacenamiento, transporte y disposición de residuos radiactivos de bajo y alto nivel; se está dando particular atención a cerrar el ciclo de combustible, es decir a minimizar al máximo la producción de residuos. Para ello, en algunos países se realiza el reprocesamiento del combustible irradiado, con objeto de reciclar la mayor parte, buscando al mismo tiempo transmutar los elementos de alto nivel radiactivo y alta vida media.

En cuanto a protección radiológica, los esfuerzos se enfocan principalmente hacia la resguardo de especies no humanas y a la aplicación de nuevos enfoques en la toma de decisiones basada en riesgo radiológico, buscando mejorar los estándares y políticas internacionales, así como las regulaciones.

Respecto a la valoración de impactos ambientales, se están cuantificando los efectos al ambiente de cada una de los eslabones del ciclo de combustible nuclear, con objeto de minimizarlos, manteniendo una buena relación costo-beneficio en cada una. De acuerdo con el estudio ExternE, la energía nuclear muestra un valor favorable de sus externalidades, comparada con fuentes convencionales.

En lo referente al análisis de costos de generación eléctrica, se mantiene una actualización constante de los costos del combustible y de los materiales, y se realizan análisis de riesgo económico.

La planeación energética y análisis de toma de decisiones es la base para determinar el potencial de crecimiento de la energía nuclear, dado que es el marco en cuanto a crecimiento de la demanda eléctrica, las restricciones ambientales, la diversificación planteada para la matriz energética, la creación de empleos, etc.

La exploración y minería de uranio son las dos primeras etapas del ciclo del combustible. A nivel mundial las técnicas de exploración del uranio (y del torio) se han modernizado en busca de disminuir su impacto ambiental, y esto se ha extendido a la fase de beneficio del mineral (separación del material fisionable).

Aun cuando la actividad nuclear se ha incrementado considerablemente, se enfrenta un importante déficit a nivel mundial de personal capacitado para todas estas áreas; ello, como consecuencia del freno puesto a esta industria. De ahí la necesidad sine qua non de reestablecer la preparación en las universidades en sus diversos niveles y fortalecer a las aún existentes.

Situación en México

Actualmente, en el país, las principales actividades en el campo nuclear están relacionadas con la operación de la central de Laguna Verde⁴⁰ (bajo la gestión de CFE), la I&D que se realiza en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), las actividades regulatorias de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), y la formación de recursos humanos y actividades de I&D que se llevan a cabo en las Instituciones de Educación Superior.

La formación de recursos humanos no sólo no se ha fortalecido, sino que incluso se ha reducido, dado que al reestructurarse los posgrados en el IPN y en la UNAM, los programas en ingeniería y ciencias nucleares desaparecieron como tales. A nivel licenciatura no existe un programa de ingeniería nuclear, como los que se ofrecen en otros países, y solamente existen cuatro programas de formación relacionada con la ingeniería nuclear en la UNAM, el IPN, la UAM-Iztapalapa y la Universidad Veracruzana. A nivel de posgrado existen programas relacionados con el área nuclear, dentro de programas de ingeniería y ciencias afines en la UNAM, el IPN, la Universidad Autónoma del Estado de México, y la Maestría en Ciencias Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

En cuanto a los programas internacionales antes citados: GIF, INPRO, GNEP, MDEP, WANO, México no participa en los cuatro primeros y en el quinto sí. Cabe mencionar que, recientemente, WANO calificó a Laguna Verde con altos índices de desempeño.

En los diferentes campos de I&DT nuclear, México está avanzando en modelación de física de reactores, verificación y validación de software y su aplicación en la optimización de combustible nuclear, en física del núcleo de reactores avanzados y en la producción nuclear de hidrógeno, en lo que a ciencias nucleares se refiere. En seguridad, trabaja en modelos de simulación para: reactores avanzados, transitorios operacionales y análisis de estabilidad, errores humanos y la incorporación de criterios de riesgo en las actividades

⁴⁰ Dos unidades de 682 MW nominales cada una, que iniciaron operación, la primera en 1990 y la segunda en 1995 y actualmente se encuentran en proceso de incrementar su potencia en 15%.

del regulador. En cuanto al manejo de desechos, hay investigación en procesos para el acondicionamiento de combustible irradiado y análisis teórico del reciclado de actínidos. Para garantizar la protección radiológica, se aplican los estándares y las normas internacionales, y se está al tanto de su evolución para su pronta implantación.

Con el crecimiento del interés en los impactos ambientales, se ha implantado el monitoreo de las emisiones radiactivas de Laguna Verde (CNLV), y se analiza su alcance y efectos. La exploración y explotación del uranio son actividades desaparecidas desde 1983, por diversas razones asociadas a la situación de esa época. Y en cuanto a la planeación estratégica, base para definir la aportación de cada una de las fuentes a la matriz energética, desafortunadamente no es una práctica que se tenga en el país, dado que, en general, los tomadores de decisión no consideran los resultados que arrojan los modelos utilizados en dicha planeación, para definir las características de la diversificación, que darían paso a la energía nuclear.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

El desarrollo de la energía nuclear de fisión en el país debe partir de un plan nacional y sectorial que contemple esta fuente de energía. De darse esta posibilidad, en tal planificación deben participar especialistas en el tema de los sectores público, privado y académico; es decir, de instituciones como: SENER, CFE, CNSNS, ININ, IIE, UNAM, IPN, UAM, UAZ y UAEM, en adición a las dependencias gubernamentales vinculadas con el presupuesto (SHCP) y con la C&T (CONACYT).

De este plan deben salir las definiciones en cuanto a: tipo de tecnología de reactores nucleares, capacidad total y unitaria a instalar, sitio de emplazamiento, capacitación de recursos humanos, estrategia para la obtención del combustible (nacional o importado), manejo y destino de los residuos, promoción de industrias vinculadas, entre las principales.

De esta manera, y de impulsarse nuevamente la energía nuclear, la I&DT a realizarse en los próximos diez años se propone se dé en 2 fases, a ejecutarse en paralelo: una, la abocada a la asimilación de tecnología y la otra a

establecer colaboraciones internacionales para el desarrollo de los sistemas nucleares más avanzados.

En la primera, se debe trabajar en investigación aplicada y desarrollo tecnológico, en los campos vinculados a la tecnología seleccionada de los próximos reactores nucleares que se deben instalar en el país, a través de contratos de transferencia de tecnología.

En la otra fase, se debe promover también la investigación básica que permita al país no sólo acelerar su capacidad de absorción tecnológica, sino que, en el mediano plazo, contar con una tecnología propia, al menos parcial, de reactores nucleares, y en algunos segmentos del ciclo de combustible. Esto, igualmente puede realizarse mediante convenios de colaboración con instituciones internacionales.

Dicha cooperación es altamente factible, en la medida que, teniendo la industria nuclear el carácter de multinacional, los proyectos de I&DT se pueden coordinar bajo el marco de la Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE, de las cuales México es miembro.

Para llevar a cabo esta estrategia en dos etapas, se plantean las siguientes áreas de I&D:

1. Ciencias nucleares:

- Física de reactores.
- Diseño y optimización de combustible.
- Ciclos de combustible avanzados: torio, plutonio, actínidos menores.
- Fraccionamiento y transmutación.
- Protección radiológica.
- Materiales.

2. Seguridad de reactores “convencionales” y avanzados:

- Termohidráulica.

- Dinámica de fluidos.
- Análisis de transitorios operacionales, accidentes severos y estabilidad.
- Análisis probabilístico de seguridad.
- Factores humanos.
- Instrumentación y control.

3. Ingeniería de sistemas y del ciclo de combustible:

- Planeación energética y análisis de toma de decisiones.
- Cogeneración: hidrógeno, desalación, industrial y propulsión.
- Exploración y explotación del uranio.
- Procesamiento y acondicionamiento de residuos radiactivos.
- Disposición final de residuos de mediano y bajo nivel.
- Disposición final del combustible gastado.

Esta estrategia debe darse en un marco de promoción y de aprovechamiento de los recursos nacionales, sean de los especialistas que conformen la masa crítica inicial necesaria para reiniciar la industria nuclear en el país, como los naturales: los minerales de uranio y torio que deben explotarse nacionalmente y con criterios sostenibles; igualmente se debe fomentar el potencial de la industria nacional. Esto debe partir del reforzamiento de la enseñanza en el campo nuclear, de los institutos de investigación del sector (ININ e IIE) y del organismo regulador, la CNSNS.

Energía nuclear de fusión

Estado del arte y perspectivas tecnológicas

La fusión nuclear consiste en unir núcleos ligeros, de modo que la suma de las masas de los núcleos resultantes es menor que la de los originales. En el Sol y las estrellas, por ejemplo, se realiza este proceso, generando helio y otros elementos, partiendo de hidrógeno como combustible primigenio. De esta forma se producen calor, luz y otras radiaciones. La diferencia de masa se libera como energía, la cual varía en función del tipo de núcleos utilizados. Dicha energía generada obedece a la fórmula $E=mc^2$, donde 'm' es la diferencia de masa antes y después de la fusión y 'c' es la velocidad de la luz (299.8×10^6 m/s). La fusión sólo pueda darse en condiciones de temperatura y densidad muy elevadas, que permitan vencer la fuerza de repulsión entre los núcleos. Se presenta estando los compuestos en estado de plasma, es decir, cuando los electrones se han “separado” del núcleo. El conocimiento y el manejo del plasma es uno de los principales desafíos de la fusión nuclear.

Tomando en consideración una de las clasificaciones de las alternativas energéticas; aquellas cuya tecnología es bien conocida y accesible sin un nivel elevado de desarrollo, las que requieren de un nivel mínimo de desarrollo (como la energía nuclear y algunas variantes de la energía solar), y las que están más allá del desarrollo (en estado de investigación y cuya tecnología aun no es madura), la fusión nuclear pertenece a ésta última. Mientras las fuentes alternativas de los dos primeros casos corresponden a tecnologías bien desarrolladas que se ofrecen ya en el mercado mundial; contrariamente, la fusión nuclear está todavía lejos de alcanzar su madurez, aun cuando el

tiempo dedicado a su investigación y desarrollo ha sido largo. Si bien en la actualidad no se puede prever cuando se tendrá una planta de energía basada en este concepto, existe una inversión considerable en su investigación por parte de los países industrializados, así como de economías emergentes como Brasil, China, Corea del Sur e India, debido a que se le vislumbra como una solución energética a largo plazo, que podrá aprovechar la abundancia de su combustible principal: el deuterio, isótopo natural del hidrógeno, presente en el agua de mar, y el litio, abundante en la corteza terrestre.

Actualmente sólo se cuenta con reactores experimentales de fusión, pero el gran interés en esta tecnología ha llevado a la decisión de construir el International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), con un costo aproximado de 5 mil millones de euros, con la participación principal de la Unión Europea, en asociación con Corea del Sur, China, EUA, la Federación Rusa, la India y Japón. El plazo previsto para el desarrollo de una primera planta prototipo, denominada DEMO, es de 30 a 40 años.

Estos plazos tan largos se deben a diversas causas:

- 1) Para poder realizar experimentos de plasmas en combustión⁴¹ ($Q > 5$) es necesario construir la siguiente generación de reactores. Sin realizar los experimentos correspondientes se ignora en qué medida aparecerán fenómenos nuevos cuando se alcancen los parámetros que requiere un reactor de fusión.
- 2) Sin contar con un reactor en el que se tengan flujos de neutrones rápidos comparables con los de una planta generadora de energía, no se tienen todavía las condiciones necesarias para probar los conceptos de transferencia de energía para generar electricidad.
- 3) Por razones semejantes, aun se está resolviendo el problema de los materiales necesarios para la primera pared del reactor, que estará sujeta a un elevado flujo de calor y de neutrones, y por tanto su activación debe ser baja.

⁴¹ Se denomina plasma de combustión al momento en que el calentamiento proporcionado por las reacciones de fusión en el plasma es mayor que el de fuentes externas.

- 4) La fecha prevista para el primer plasma del ITER es en el 2018 y lo más probable es que no se estudien plasmas en combustión ($Q > 5$) antes de 2023; la única posibilidad de que esto ocurra, es que paralelamente a ITER, se instrumenten proyectos como IGNITOR completamente enfocado a alcanzar ignición en el corto plazo.

Hay que recordar que, si bien la fusión nuclear controlada no ha sido alcanzada plenamente, ha aportado desarrollos científicos y tecnológicos que pueden tener aplicaciones en diversos campos, como son los relacionados con el caos hamiltoniano, el transporte de energía y el momento angular, la reconexión del campo magnético, la interacción entre el plasma y los materiales de las paredes, el mantenimiento a control remoto de un equipo complejo, los materiales superconductores y los resistentes a la activación neutrónica y al flujo de calor, la adquisición de datos, el control de experimentos y diagnósticos a larga distancia, etc.

Sin embargo, para fines energéticos, la fusión plantea todavía diversos desafíos a la física y a la ingeniería en su nivel actual, iniciando con el confinamiento y calentamiento del plasma, tema sobre el que se trabaja en dos vías: confinamiento magnético o inercial.

Por otra parte, una alternativa que se está discutiendo recientemente, es el papel que puede jugar la fusión nuclear, en su estado tecnológico actual, no como una alternativa independiente, sino en simbiosis con la fisión nuclear. En este caso, se podrían emplear los altos flujos de neutrones rápidos de un reactor de fusión con $Q = 1-2$ para eliminar desechos de vida media larga de los reactores de fisión, y para la cría de combustible fisiónable.

Situación en México

A la fecha, es muy reducido el número de científicos nacionales abocados a este campo; las principales actividades se desarrollan en la UNAM (Instituto de Ciencias Nucleares), en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), y en el CICATA del IPN en Querétaro. Estos grupos han establecido una red con el propósito de realizar investigación teórica y experimental de problemas de equilibrio, estabilidad y transporte de plasmas confinados magnéticamente, estudiándose en particular los mecanismos que permitan

mejorar el confinamiento de plasmas en aparatos de confinamiento toroidal, como son los tokamaks y los stellarators. Recientemente se están instrumentando experimentos para simular las condiciones que se presentan en borde del reactor para realizar estudios de materiales.

Los trabajos realizados en estas instituciones colocan a México como una nación con capacidad de hacer aportaciones científicas a este campo e inclusive poder llegar a la fase de propiedad industrial; para su concreción, es indispensable recuperar esfuerzos realizados en el pasado y conjugarlos con los actuales para consolidar y potenciar una masa crítica que interactúe con grupos estructurados a nivel internacional. Para tal efecto, será necesario, al igual que en el caso de la fisión nuclear, ofertar de nueva cuenta posgrados en fusión, en la consideración de que la formación de recursos humanos especializados toma por lo menos 4-5 años, bajo un esquema de doctorado directo y partiendo de un nivel de licenciatura.

Líneas de I&DT específicas para su implantación en los próximos 10 años en México

Con objeto de promover la I&D en fusión nuclear en el país, se plantean las siguientes acciones:

- Diseñar y construir un reactor de tamaño pequeño, acción medular que permita habilitar todas las otras líneas de investigación vinculadas a la energía de fusión, aparte de promover la consolidación de la comunidad científica nacional y cumplir adicionalmente con el requisito indispensable de establecer colaboraciones internacionales.
- Definir los objetivos científico-tecnológicos, preferentemente enfocados a abordar problemas aún no resueltos, consiguiendo de esta manera una contribución relevante en el campo.
- Optimización del diseño en función de las limitantes tecnológicas, económicas y de recursos humanos.

- Construir infraestructura dedicada, v.g. cañón coaxial de plasma intenso capaz eyectar un plasma de alta temperatura y hacerlo incidir en un material o dispositivo de prueba (ya se han iniciado esfuerzos con un cañón de tamaño pequeño: Proyecto CONACYT CB-2007-84176).

De estas líneas de investigación globales pueden definirse actividades específicas:

- Diseño de sistemas electromagnéticos pulsados de alta potencia basados en conductores convencionales y superconductores de baja y alta temperatura.
- Diseño mecánico y análisis estructural de esfuerzos.
- Diseño de sistemas de control de potencia.
- Estudios sobre la supresión de turbulencia en plasmas confinados magnéticamente.
- Estudio de materiales en su interacción con plasmas de alta densidad y con alto flujo de calor.
- Estudio de sistemas híbridos fisión/fusión: avanzar en los conceptos teóricos de aplicación de sistemas de fusión nuclear para la producción de material fisionable (aún no explorado experimentalmente), basados en el hecho de que los sistemas de fusión son fuentes ricas en neutrones energéticos que pueden tener aplicaciones muy diversas: cría de combustible, transmutación de desechos radiactivos de vida media larga, operación de ensambles subcríticos para aplicaciones de potencia, entre otras.
- Diagnósticos para plasmas de alta temperatura: reflectometría de microondas, campo en el que se ha adquirido gran experiencia mediante colaboraciones internacionales como la establecida con Brasil (investigación en su tokamak TCABR), Portugal (reactor experimental ISTTOK) y Rusia (T-10).

- Modelado de plasmas confinados magnéticamente, aprovechando el extenso trabajo realizado en México en el campo informático (debido en gran parte a su menor costo y mayor disponibilidad de la infraestructura), que a través de colaboraciones internacionales activas con grupos en España y EUA, se ha avanzado en el desarrollo y la validación de códigos computacionales de física de plasmas, a partir de los cuales se estudian problemas como la reconstrucción de equilibrio magnetohidrodinámico, la interacción de ondas electromagnéticas con plasmas magnetizados, el transporte de partículas del plasma hacia la pared, la presencia de partículas de polvo en el plasma, el transporte de impurezas de la pared hacia el plasma, la interacción de los componentes sólidos con el plasma, etc.

Hasta el momento, las colaboraciones internacionales se han restringido al trabajo en modelación de los plasmas de reactores experimentales extranjeros, por lo que la construcción de un equipo doméstico permitirá explorar nuevos regímenes de plasma y verificar la validez de sus códigos, generando una sinergia entre el modelado computacional y los resultados experimentales. Así, los grupos mexicanos tendrán una contribución más relevante en el conocimiento y facilitará su paso a participar en reactores de fusión avanzados.







Energías alternas: propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México se terminó de imprimir en mayo de 2010 en los talleres de CREATIVA IMPRESORES S.A. de C.V. calle 12, número 101, local 1, colonia José López Portillo, Iztapalapa, 09920, México, D.F. Tel. 5703-2241. En su composición se utilizaron tipos Calibri y Times News Roman. La edición consta de 1000 ejemplares.

