

ENERGÍA del AGUA



Steven Peter Reed Czitrom, Sergio Armando Trelles y Gerardo Hiriart

Actualmente, la Comisión Federal de Electricidad estimó un potencial nacional hidroeléctrico de 52 427 megawatts en 583 sitios. La creación de pequeñas y grandes centrales hidroeléctricas, fuente de energía renovable, limpia y confiable, hará posible beneficios económicos, ambientales y sociales de gran importancia.

Se prevé que en los próximos años la demanda de energía eléctrica en México crezca notoriamente. Para atender dicho crecimiento, se ha iniciado una transición energética en la que se está fomentando cada vez más el uso de fuentes renovables y limpias.

El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 prevé alcanzar 25 por ciento de energía renovable. Esto es motivado por el agotamiento inminente de los hidrocarburos de que dispone nuestro país, la variación errática en los precios mundiales del petróleo, y la degradación ambiental que provocan los combustibles fósiles. Entre las tecnologías aplicables destacan: a) las grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas; b) la energía de las mareas; y, c) la energía de las olas.

I. Generación de energía renovable con grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas

La energía producida por el movimiento del agua en la naturaleza es renovable, pues el ciclo hidrológico anual es impulsado por la energía solar. Las centrales hidroeléctricas aprovechan el caudal y el desnivel o carga hidráulica de una corriente de agua, sea ésta natural o artificial. La energía potencial, de presión y cinética del agua, es convertida en energía eléctrica mediante turbinas y generadores de alta eficiencia.



Según la *International Hydropower Association*,
16.1 por ciento
del suministro eléctrico global
proviene de centrales
hidroeléctricas

Tipos de centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas se clasifican por su potencia instalada. En México se considera que una central es *grande* si excede 30 megawatts (un megawatt equivale a un millón de watts, unidades en que se mide la potencia eléctrica); *pequeña* si produce entre 30 y un megawatts; *mini* si produce entre un megawatt y 100 kilowatts; y *micro* si produce entre 100 y 10 kilowatts. En algunos países se habla de centrales pico cuando su potencia es menor que 10 kilowatts. Con frecuencia las desventajas que han obstaculizado el desarrollo de las grandes centrales hidroeléctricas se atribuyen sin análisis a las pequeñas centrales hidroeléctricas, frenando su desarrollo.

Esquemas de aprovechamiento

Las centrales hidroeléctricas se construyen con diversos esquemas de aprovechamiento en corrientes superficiales. Las grandes centrales hidroeléctricas comúnmente requieren la construcción de una presa y un embalse con capacidad para almacenar el escurrimiento de la corriente en los meses lluviosos del año, y regular su extracción por las turbinas en los meses de estiaje. Existen, también, posibilidades de aprovechar la acumulación de energía por bombeo, en los que el agua fluye de un embalse superior a otro inferior, generando hidroelectricidad durante los periodos horarios de mayor demanda y precio de energía. Luego, el mismo volumen de agua es bombeado al embalse superior durante los periodos horarios de menor demanda y precio.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas pueden requerir la construcción de una presa de poca altura y un embalse con capacidad de regulación diaria o semanal. Otra posibilidad es instalarlas al pie de presas ya existentes de almacenamiento para riego o suministro urbano. El caso más frecuente es que las pequeñas centrales hidroeléctricas se construyan sin embalse, por lo que se dice que funcionan *al hilo del agua* o de pasada (Figura 1).

Impactos benéficos y adversos

Las centrales hidroeléctricas tienen impactos benéficos y adversos de tipo ambiental, social y económico. En general, el balance es crecientemente benéfico, como se observa en el nuevo impulso que está adquiriendo en México y en muchos países el desarrollo de grandes centrales hidroeléctricas y, más aún, de pequeñas centrales hidroeléctricas.

Impacto ambiental

Las centrales hidroeléctricas reducen las emisiones de gases de efecto invernadero al sustituir la energía producida por centrales que consumen combustibles fósiles, y también reducen la deforestación al eliminar el uso de leña. Estas centrales no consumen agua, salvo la que se evapora de los embalses, y no contaminan el agua ni el suelo. Al construir un embalse para una central hidroeléctrica se mejora el manejo del agua en la cuenca, se provee un medio para la vida acuática y se mitigan las sequías y las inundaciones.

Las grandes centrales hidroeléctricas pueden causar impactos ambientales adversos dependiendo de la dimensión de la presa, el embalse y otras obras, con algunos de los siguientes efectos: perturbación local durante la construcción, inundación de localidades, afectación de sitios culturales y terrenos productivos, desplazamiento de fauna, obstrucción a la migración de peces, daño o muerte de peces en las turbinas, cambio de régimen de escurrimiento y transporte de sedimentos, contaminación del agua embalsada y emisión de dióxido de carbono y metano por la descomposición de la vegetación inundada.

El impacto ambiental de las pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo del agua y en obras hidráulicas existentes es mínimo, pues no alteran el régimen de escurrimiento y usan muy poco espacio en el cauce.

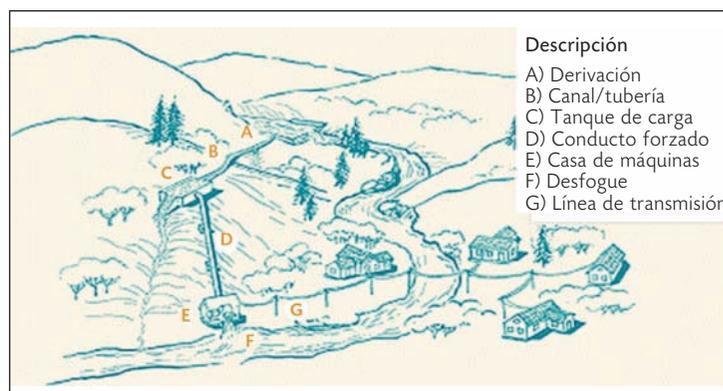


Figura 1. Esquema de pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo del agua.



Desarrollo de la hidroelectricidad

Según la *International Hydropower Association*, 16.1 por ciento del suministro eléctrico global proviene de centrales hidroeléctricas. En México, la capacidad instalada del sistema eléctrico nacional es de 51 mil 105 megawatts, de los cuales 11 mil 343 corresponden a centrales hidroeléctricas, que equivalen al 22.2 por ciento del total. En términos de energía generada, el total nacional en 2007 fue de 232.6 terawatts-hora (un terawatt equivale a un billón –un millón de millones– de watts-hora, unidad en que se mide la energía eléctrica), de los cuales 27 terawatts-hora fueron producidos por centrales hidroeléctricas, lo que equivale al 11.6 por ciento. Del total de 79 centrales en el servicio público, 32 son grandes centrales hidroeléctricas.

Potencial hidroeléctrico de las grandes centrales hidroeléctricas

En el año 2000, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) estimó un potencial nacional hidroeléctrico de 52 mil 427 megawatts en 583 sitios. En la planeación actual, la Comisión Federal de Electricidad tiene localizados 28 sitios para grandes centrales hidroeléctricas en las etapas de pre-factibilidad, factibilidad o diseño, con capacidad conjunta de 7 mil 624 megawatts. De ellos, el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009-2018 espera desarrollar 2 mil 124 megawatts en el escenario base, y 2 mil 244 megawatts en el de mayor crecimiento.

Potencial hidroeléctrico de las pequeñas centrales hidroeléctricas

El potencial energético nacional de las pequeñas centrales hidroeléctricas es desconocido, lo que ha inhibido su desarrollo. Un estudio del potencial hidroeléctrico de las pequeñas centrales hidroeléctricas en varias cuencas de Puebla y Veracruz, que cubren 26 mil 375 kilómetros cuadrados, permitió identificar 62 sitios viables con potencia conjunta de 250 megawatts (CONAE, 1995) y se estimó el potencial nacional en unos 3 mil 200 megawatts. En otro estudio realizado en 2003, sobre 2 mil 400 kilómetros cuadrados en torno a Orizaba, Veracruz, se identificaron 15 sitios con una potencia conjunta de 70 megawatts. Por otra parte, se difundió un catálogo de sitios (CFE, 2006) con 112 fichas de proyectos en varias regiones del país que la Comisión Federal de Electricidad no planea desarrollar.

Condiciones de entorno para el desarrollo del potencial hidroeléctrico

El entorno nacional es favorable para la expansión de las energías renovables, particular-

mente por la nueva *Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética*, que contempla para las pequeñas centrales hidroeléctricas incentivos económicos, instrumentos de financiamiento, facilidades administrativas, facilidades de incorporación a la red eléctrica interconectada y apoyo tecnológico, entre otras medidas.

Conclusiones

En resumen, las grandes y las pequeñas centrales hidroeléctricas son fuentes de energía renovable, limpia y confiable. Su desarrollo hará posibles beneficios económicos, ambientales y sociales de gran importancia. Se ha desarrollado cerca de una quinta parte del potencial hidroeléctrico estimado por la Comisión Federal de Electricidad. No se conoce el potencial nacional de las pequeñas centrales hidroeléctricas, pero la disponibilidad de agua y el relieve en vastas regiones de México permiten suponer que existe un potencial mayor que el

estimado en corrientes naturales y artificiales. Existe un entorno nacional e internacional favorable para el desarrollo de las energías renovables, dentro de las que destaca la energía hidroeléctrica producida con pequeñas centrales hidroeléctricas.

II.

Potencial energético de las mareas para generar electricidad

A pesar de que el efecto de atracción gravitacional de la Luna y el Sol es similar para todas las costas marinas del mundo, hay sitios donde la marea alcanza niveles extraordinarios. Los casos más relevantes son La Rance, en Francia, donde la marea tiene una amplitud de 14 metros; la bahía de Severn, en Bristol, Inglaterra, con 15 metros, y la mayor del mundo, en la Bahía de Fundy, en Canadá, con amplitudes hasta de 15 metros.

Este fenómeno es principalmente un asunto de *resonancia hidráulica*, donde el tiempo que tarda la onda de mareas en ir y regresar al fondo del estuario es igual a, o un múltiplo de, el tiempo que tarda en subir y bajar la marea. En algunos lugares el perfil submarino exagera la amplificación, ya que la fricción con el



Planta de La Rance, Francia. www.edf.com



Figura 2. Doble embalse desarrollado en el Proyecto IMPULSA.

fondo marino retarda el avance de la onda de marea, de forma que es alcanzada por la onda que viene atrás, y se produce un “encamamiento”, que se traduce en una amplificación de la marea.

Aprovechamiento de las mareas mediante embalse

Para aprovechar esta energía potencial de la marea, la bahía se puede cerrar mediante una gran cortina con compuertas y turbinas. Cuando sube la marea, las compuertas se abren y dejan que se llene el embalse. Cuando empieza a bajar la marea, se deja que el embalse se vaya vaciando a través de las turbinas hidráulicas. En el caso de La Rance, Francia, hay instaladas 24 turbinas de 10 megawatts que funcionan desde 1967.

En México existen mareas de siete metros en la parte alta del golfo de California, la cual ha sido estudiada en el Proyecto IMPULSA IV, y cuyos resultados preliminares se han explicado en Alcocer e Hiriart (2008). Ahí se concluye que en la parte alta del Golfo se podrían generar más de 20 mil megawatts de potencia eléctrica. Evidentemente este cálculo es sólo teórico, ya que en la realidad se tendrían grandes problemas de impacto ecológico y altos costos de la obra; estos últimos derivados de la dificultad para construir una cortina en un suelo tan fangoso como el de la región, aunque ésta sería sólo de 20 metros de altura.

Lo caro del proyecto radicaría más en las turbinas, ya que éstas serían de un diámetro máximo de cinco metros, lo cual limitaría su potencia unitaria, con esa carga hidráulica, a dos megawatts. Es decir, para obtener esos 20 mil megawatts se requerirían 10 mil turbinas con sus respectivos generadores eléc-

tricos. El potencial energético de las mareas en el alto Golfo es de 14 megawatts por kilómetro cuadrado del área marina, o en términos de energía, de 8.4 gigawatts-hora por año (un gigawatt hora por año equivale a mil millones de watts hora por año).

También se han calculado en el programa IMPULSA casos especiales donde se instala un doble embalse: uno permanece siempre con el nivel máximo posible, mediante compuertas, y el otro a un nivel siempre bajo. Entre ambos estanques se instalan turbinas hidráulicas de poca carga que pueden generar electricidad de forma continua (Figura 2). Este esquema se ha estudiado para ser instalado frente a Puerto Peñasco, donde con un kilómetro cuadrado se podrían generar en forma continua cinco megawatts. Además, los embalses se podrían usar para acuicultura especializada de la zona.

Corrientes marinas

Además de las corrientes oceánicas, existen las de mareas, que son las que más atención están recibiendo en la actualidad, con una serie de modelos piloto. La marea que entra y sale de una bahía a veces ocasiona fuertes corrientes que se pueden aprovechar con una especie de “aerogeneradores” submarinos. La Agencia Internacional de Energía/Energías del Océano (IEA-OES, por sus siglas en inglés), en la cual México participa activamente, acaba de publicar un catálogo con todas las tecnologías que se han desarrollado a la fecha. Ahí aparecen tres inventos mexicanos (IEA-OES, 2009).

Tres tipos de turbinas

A continuación se describen las características de tres clases importantes de turbinas:

1) *Turbina SeaFlow* (Figura 3): fue la primera máquina que utilizó la corriente de mareas para generar electricidad; fue construida por la compañía Marine Current Turbines Ltd. en 2002-2003. Tiene un diámetro de rotor de 11 metros y una potencia de salida de 300 kilowatts. Se ins-



Figura 3.



Figura 4.



Figura 5.

taló el 30 de mayo de 2003 y hasta la fecha continúa generando corriente eléctrica.

2) *Gorlov Turbine* (Figura 4): turbina helicoidal desarrollada a partir de la turbina Darrieus, alterando el diseño de hojas helicoidales. La diferencia principal es la orientación del eje en relación con el flujo de corriente. La ventaja es que, independientemente de la dirección del flujo, la turbina gira siempre en la misma dirección; puede generar de 30 a 50 kilowatts.

3) *Turbina Impulsa* (Figura 5): el hidrogenador Impulsa, que el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) está desarrollando, puede aprovechar cualquier corriente o flujo de agua. Puede aprovechar corrientes de marea o de cualquier río. Es flotante, de diseño mexicano, y puede generar 20 kilowatts por turbina.

III.

Generación de electricidad a partir de la energía del oleaje

Desde tiempos inmemoriales, el ser humano ha soñado con aprovechar el constante embate de las olas del mar sobre la playa. En los años setenta del siglo pasado, con la primera crisis petrolera, se impulsó el desarrollo de tecnologías para aprovechar la energía del oleaje. Este impulso quedó en suspenso cuando aumentó la producción petrolera, con la consecuente disminución en precios. Ahora nuevamente adquiere relevancia al acercarse el fin de las reservas de petróleo, así como los cambios climáticos que provoca la acumulación de gases de invernadero por la quema de hidrocarburos.

El recurso

La energía de las olas es producto del viento que sopla sobre los mares, impulsado a su vez por la energía solar. Dado que las olas pierden poca energía al avanzar por los océanos, a las costas llega la energía que se ha acumulado sobre enormes extensiones oceánicas. Esto hace que el oleaje sea una fuente de energía relativamente estable y de alta calidad.

En la Figura 6 se muestra un mapa de la distribución de la energía del oleaje disponible por metro de frente de onda en los océanos del mundo. Las zonas de máxima energía (de 30 y hasta más de 60 kilowatts/hora por metro) corresponden a latitudes de más de 30 grados. A México llegan, en la costa del Pacífico de la península de Baja California, alrededor de 25 kilowatts/hora por metro, y 15 kilowatts/hora por metro en el resto del Pacífico. En el golfo de California, el golfo de México y el mar Caribe,

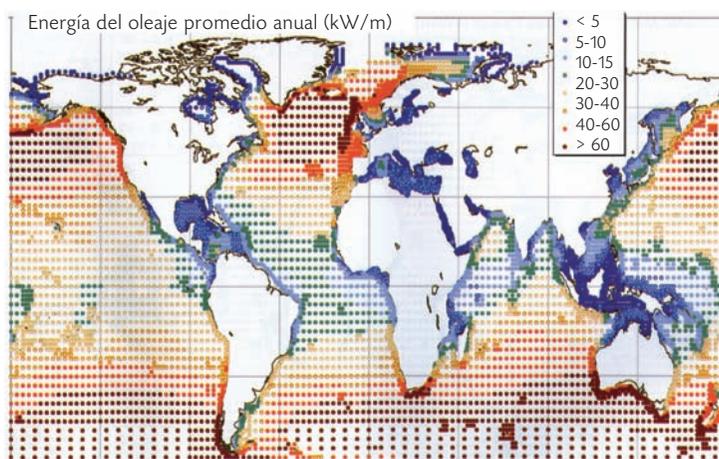


Figura 6. Promedio anual de la energía del oleaje en los mares del mundo en kilowatts por metro de frente de onda (Tomado de Cruz, 2008).

que están más protegidos, llegan alrededor de 5 kilowatts/hora por metro.

A pesar de la distribución no-homogénea a nivel mundial, México cuenta con un recurso energético considerable en el oleaje. En promedio, a lo largo del año, a nuestras costas llegan aproximadamente 115 gigawatts en las olas, que es más del doble del consumo de electricidad en México durante 2007. Se estima que cuando la tecnología para producir electricidad a partir del oleaje esté plenamente desarrollada, se podrá extraer de esta fuente energética entre el 10 y el 25 por ciento; si bien no es una panacea, sin duda puede contribuir sustancialmente a las necesidades energéticas de México, sobre todo si se piensa en poblaciones costeras aisladas. A nivel global se calcula que el consumo de electricidad equivale aproximadamente a lo disponible en el oleaje en los mares del mundo.

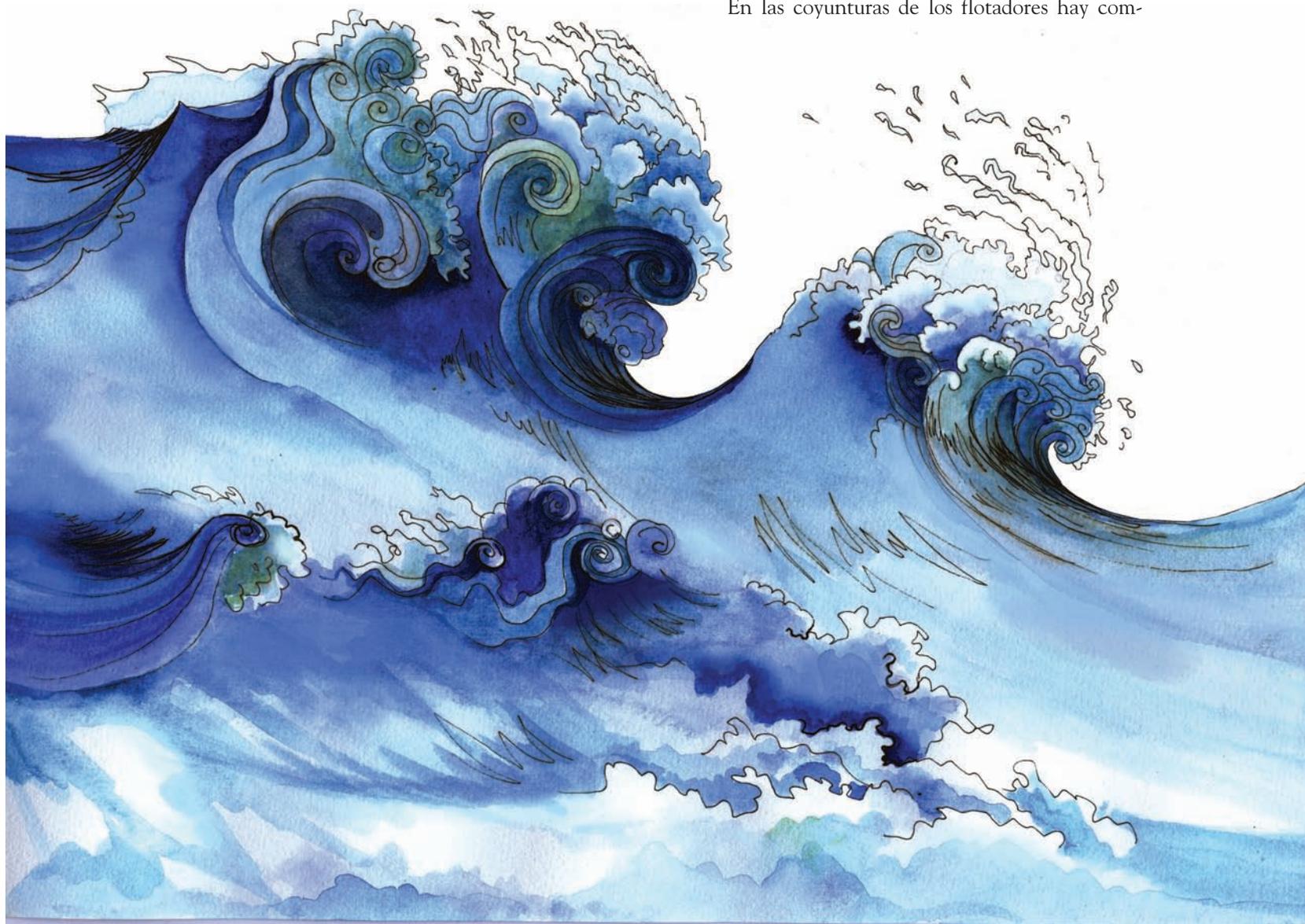
Algunas tecnologías actualmente disponibles

A continuación se describen brevemente algunas tecnologías que han sido desarrolladas hasta el nivel de prototipo a escala

real para generar electricidad para la red. Son una pequeña muestra del sinnúmero de inventos existentes, y son algunas de las que han logrado un mayor desarrollo:

OWC: los convertidores de energía de oleaje *OWC* (por sus siglas en inglés, *Oscillating Water Column*, o *Columna Oscilante de Agua*) consisten de una cámara de aire instalada en la orilla del mar y conectada al océano por medio de un conducto sumergido. El agua en la cámara oscila verticalmente por acción de las olas, comprimiendo y descomprimiendo el aire que acciona una turbina generadora de electricidad. Se han instalado sistemas *owc* experimentales en Escocia y en las islas Azores de Portugal, que generan del orden de 0.5 megawatts para la red.

Pelamis: entre las tecnologías más desarrolladas hasta ahora está el llamado pelamos, que consiste en una serie de flotadores articulados que se conforman al oleaje incidente (Figura 7). En las coyunturas de los flotadores hay com-



presores que aprovechan el movimiento entre ellos para comprimir líquido hidráulico que a su vez acciona generadores de electricidad. Para un oleaje típico en altas latitudes, la tecnología pelamis tiene una potencia nominal del orden de 0.75 megawatts.

AWS: el Archimedes Wave Swing (balancín de olas Arquímedes) está compuesto por un contenedor de aire, sumergido y anclado al fondo oceánico, tapado por un cilindro que oscila verticalmente en respuesta a la expansión o compresión del aire en la cámara, al paso de los valles y las crestas del oleaje. Al moverse, el cilindro activa un generador de electricidad con una potencia nominal de un megawatt. Una ventaja de este sistema es que, al estar sumergido, es menos vulnerable a la acción de las tormentas en comparación con los localizados en la superficie. Esta característica también lo hace atractivo, porque que no altera el paisaje natural del océano.

Wave Dragon (Dragón de olas): este sistema concentra las olas hacia un almacén que flota sobre el mar. La concentración de la energía del oleaje se logra por medio de dos brazos que reflejan el oleaje hacia el almacén. Las olas sobrepasan el borde del almacén y el agua acumulada regresa al mar pasando por turbinas que generan electricidad. Este sistema es el más grande convertidor de energía del oleaje en desarrollo hoy en día, con una potencia nominal de entre 4 y 11 megawatts. Un prototipo experimental se encuentra en el Mar del Norte, cerca de Dinamarca.

La energía del oleaje en México

Se han hecho algunos intentos en México para desarrollar tecnología que convierta la energía del oleaje en electricidad. Desafortunadamente, hasta ahora no han prosperado para convertirse en opciones viables; en muchos casos porque falta uno o más de los elementos de la colaboración academia-gobierno-industria que ha sido esencial en el desarrollo de las alternativas descritas arriba.



Figura 7. Prototipo experimental del Pelamis (Tomado de Cruz, 2008).

Como una alternativa a la producción de electricidad, en la Universidad Nacional Autónoma de México se ha propuesto un uso diferente para la energía del oleaje. Se han desarrollado Sistemas de Bombeo por Energía de Oleaje (SIBEO, Figura 8), con el objetivo de manejar ecosistemas costeros. Estos sistemas bombean agua limpia y oxigenada de la zona de rompientes hacia cuerpos de agua contaminados, promoviendo su dilución y biodegradación. Asimismo, al no tener partes móviles, los sibeos permiten el paso de larvas marinas, por lo que pueden usarse para manejar biológicamente los cuerpos de agua receptores y así fomentar la acuicultura extensiva (Czitrom y colaboradores, 2000).

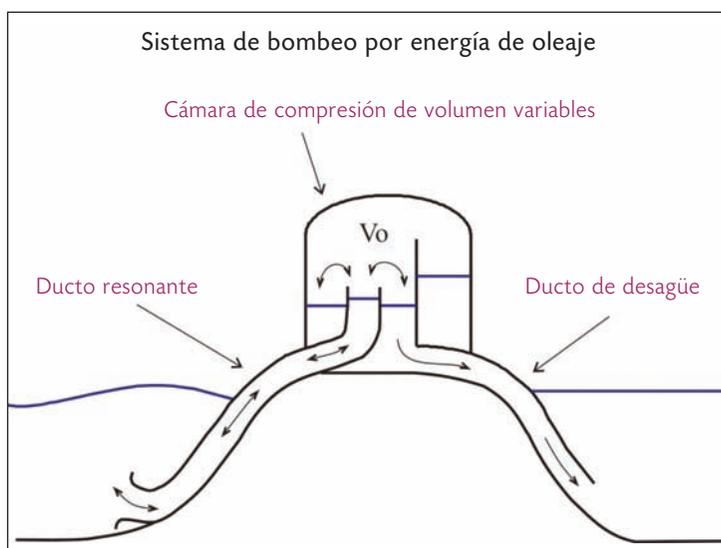


Figura 8. Diagrama del Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje (SIBEO).

Steven Peter Reed Czitrom Baus es físico por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y doctor en oceanografía física por el University College of North Wales, Gran Bretaña. Trabaja en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM desde 1983, primero sobre frentes oceánicos y posteriormente sobre la circulación y manejo de ecosistemas costeros como lagunas y puertos. A partir de 1990 trabaja en el desarrollo de tecnología para el aprovechamiento de la energía del oleaje. Actualmente se encuentra comisionado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.
 czitrom@cmarl.unam.mx

Sergio Armando Trelles Jasso es ingeniero civil por el Centro Nacional de Enseñanza Técnica Industrial (CENETI) y tiene una especialidad en hidráulica por la Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE), en Francia; otra especialidad en manejo de los recursos hidráulicos por la Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH) del Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Francia. Trabaja desde 1986 en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y cuenta con amplia experiencia en los sectores de agua, energía y medio ambiente. Ha conducido la evaluación sistemática del potencial de pequeñas centrales hidroeléctricas en corrientes naturales y en estructuras hidráulicas existentes en México. Con el equipo de especialistas que encabeza, han aplicado tecnología de punta en modelación hidrológica distribuida y geomática para evaluar sitios de proyecto en términos hídricos, energéticos y económicos, metodología aplicable en todo México y en otros países que no cuentan con inventarios precisos de pequeñas centrales hidroeléctricas.
 atrelles@tlaloc.imta.mx

Gerardo Hiriart Le Bert es ingeniero mecánico naval por la Armada de Chile, y doctor en Fluidos y Térmica por la Escuela Naval de Posgraduados de Monterey, California. Laboró 26 años en la Comisión Federal de Electricidad, en el área de geotermia y otras energías renovables. Actualmente encabeza el megaproyecto de la UNAM sobre desalación con energías renovables. Es representante alterno de México en la Agencia Internacional de Energía, capítulo "Energías del océano".
 ghiriartL@iingen.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Alcocer, S. M. y G. Hiriart (2008), "An applied research program on water desalination with renewable energies", *American Journal of Environmental Sciences*, 4 (3), 190-197.
- Comisión Federal de Electricidad (2006), *Fomento a proyectos hidroeléctricos para inversión social y privada*, Subdirección de Construcción, Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, México.
- Comisión Federal de Electricidad (2009), *Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009-2018 (POISE)*, Subdirección de Programación, Coordinación de Planificación, Comisión Federal de Electricidad, México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONAE, 1995), *Situación actual de la minihidráulica y determinación del potencial aprovechable en una región de los estados de Veracruz y Puebla*, CONAE, México. Disponible en: www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_1601_publicaciones_de_ene.
- Cruz, J. (Editor, 2008), *Ocean wave energy, current status and future perspectives*, Springer.
- Czitrom, S. P. R., R. Godoy, E. Prado, A. Olvera y C. Stern (2000), "Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump, part II: tuning to monochromatic waves", *Ocean Engineering*, 27 (11), 1199-1219.
- GCK Technology Inc. (sin fecha), "Gorlov Helical Turbine", Estados Unidos. Disponible en: www.gcktechnology.com
- IEA-IOES (2009), "Ocean Energy Systems". Disponible en: www.iea-oceans.org
- Marine Current Turbines (sin fecha), "SeaFlow and SeaGen", *Turning the tide*, Reino Unido. Disponible en: www.marineturbines.com
- Proyecto IMPULSA IV (sin fecha), "Desalación de agua de mar con energías renovables", Instituto de Ingeniería, UNAM. Disponible en: www.impulsa4.unam.mx

