



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL FLUJO DE UNA DESCARGA  
DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL MAR COSTERO DE YUCATÁN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE FÍSICO:

P R E S E N T A :

ANA ESHAI GARCÍA SARABIA



DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTIZ  
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## HOJA DE DATOS DEL JURADO

### 1. Datos del alumno

Apellido paterno  
Apellido materno  
Nombre(s)  
Teléfono  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Carrera  
Número de cuenta

### 1. Datos del alumno

García  
Sarabia  
Ana Eshai  
5543110248  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
306303573

### 2. Datos del tutor

Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

### 2. Datos del tutor

Dra.  
Cecilia  
Enríquez  
Ortiz

### 3. Datos del sinodal 1

Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

### 3. Datos del sinodal 1

Dr.  
Joan Albert  
Sánchez  
Cabeza

### 4. Datos del sinodal 2

Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

### 4. Datos del sinodal 2

Dra.  
Jazmín  
Carranza  
Gallardo

### 5. Datos del sinodal 3

Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

### 5. Datos del sinodal 3

Dra.  
Susana  
Orozco  
Segovia

### 6. Datos del sinodal 4

Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

### 6. Datos del sinodal 4

M. en C.  
Sergio  
Hernández  
Zapata

### 7. Datos del trabajo escrito.

Título  
Subtítulo

### 7. Datos del trabajo escrito

Estudio del potencial energético del flujo de una descarga de agua subterránea submarina en el mar costero de Yucatán

Número de páginas  
Año

55  
2019

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo incondicional a seguir adelante para concluir mis estudios universitarios y a mi hermana por su constante ayuda en los momentos adversos.

A la Dra. Cecilia Enríquez por la orientación, asesorías y consejos que me brindo en todo el tiempo en el que se realice mi proyecto de tesis.

Al Dr. Ismael Mariño por la aportación de los datos para llevar a cabo esta investigación.

Y principalmente a la Facultad de Ciencias por tantas experiencias a lo largo de mi formación académica.

También a CEMIE-Oceáno por el apoyo recibido para realizar mi estancia en la UMDI-Sisal.



## RESUMEN

La cantidad de energía que hay en los océanos es enorme. Hoy en día, la energía eléctrica se obtiene del mar proveniente de las olas, corrientes marinas, corrientes de marea, levantamiento y descenso de marea, gradientes de temperatura y gradientes de salinidad. Este trabajo presenta una nueva propuesta como opción para la microgeneración de energía a través de una microturbina en una fuente puntual de una descarga de agua subterránea submarina. En el manantial submarino Xbuya-Ha, en Yucatán, a partir de mediciones *in situ* de descarga, se realizaron cálculos del potencial máximo extraíble en tres casos específicos con respecto a las variaciones estacionales (lluvias, secas y el paso de un huracán). Se obtuvieron valores máximos de la velocidad del flujo de 3.17 m/s en la temporada de lluvias que ofreció el máximo potencial energético de  $PE(\max)=1.29$  MW/m<sup>2</sup>; en la temporada de secas el flujo disminuye considerablemente, manteniendo valores de velocidad que siguen siendo sustanciales con una velocidad máxima de 1.5 m/s y un  $PE(\max)= 0.325$  MW/m<sup>2</sup>; tras el paso del huracán Ike, el flujo se ve sustancialmente bloqueado, alcanzando un valor de 0.5 m/s en la velocidad máxima con un  $PE(\max)= 2.26$  kW/m<sup>2</sup>. Las velocidades de descarga son altamente variables en períodos diurnos, moduladas por el ascenso y descenso de las mareas. También se analizó un ciclo de marea quincenal para analizar la transición entre mareas vivas y muertas (ver sección 2.3.4). Los resultados mostraron que en mareas vivas hay un mayor potencial energético que en mareas muertas, debido que se presentan las velocidades más altas. De las series de tiempo de corrientes, se obtuvieron los armónicos de la marea, encontrando como principales armónicos  $K_1$  y  $O_1$  siendo los más energéticos de los picos espectrales de corriente del flujo observados, otro componente mareal de importancia fue  $M_2$ . De estos resultados se concluye que la descarga está siempre determinada y forzada por la marea, y que esta fracción del flujo es predecible y calculable; que las variaciones estacionales tiene una componente importante que modifica el flujo y por tanto, su potencial, aumentando en lluvias y disminuyendo en temporada de secas; que eventos climáticos extremos pueden dominar y superar en el control del flujo de descarga en períodos cortos, como lo hace el paso de un huracán en las cercanías; y que prácticamente todo el año existen condiciones para la generación de energía local, que en este caso podría por ejemplo suministrar energía a un sistema de monitoreo continuo a largo plazo de este interesante sitio.

# CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN .....	vi
CONTENIDO .....	vii
LISTA DE TABLAS .....	ix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1. EL PROBLEMA A INVESTIGAR .....	2
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 ENERGÍAS RENOVABLES.....	4
2.2 PANORAMA MUNDIAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES .....	6
2.2.1 PERSPECTIVA DE LAS ER A NIVEL INTERNACIONAL .....	6
2.2.2 PERSPECTIVA DE LAS ER EN MÉXICO .....	7
2.2.3 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS ER EN MÉXICO .....	8
2.2.4 POTENCIAL DE LAS ER EN MÉXICO .....	9
2.3 ENERGÍAS OCEÁNICAS .....	10
2.3.1 ENERGÍA POR OLAS (UNDIMOTRIZ).....	13
2.3.2 ENERGÍA OCEÁNICA TÉRMICA (OTEC) .....	16
2.3.3 ENERGÍA POR GRADIENTES SALINOS.....	16
2.3.4 ENERGÍA POR MAREAS (MAREOMOTRIZ).....	17
2.3.5 ENERGÍA POR CORRIENTES MARINAS .....	19
2.5 TURBINA GORLOV .....	26
2.6 IMPACTO AMBIENTAL .....	27
2.7 NORMATIVIDAD .....	28
CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO.....	30
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO .....	31
3.2 METODOLOGÍA .....	34
3.2.1 DATOS DE LA DASS .....	34
3.2.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS .....	35
3.2.3 ANÁLISIS DE FOURIER .....	36
3.3.3 DENSIDAD DE PODER ESPECTRAL.....	40
3.3.4 SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE ENERGÍA.....	40



3.3.5 CÁLCULO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO .....	41
CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....	42
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....	51
REFERENCIAS .....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una central mareomotriz de efecto simple .....	18
Figura 2. Comparación del tamaño entre una turbina eólica y una turbina de corrientes marinas para obtener 1 MW. ....	19
Figura 3. Turbinas hidrocinéticas de flujo axial (Khan et al., 2009). ....	24
Figura 4. Turbinas hidrocinéticas de eje vertical o flujo cruzado (Khan et al., 2009). ....	25
Figura 5. Tipos de conductos y difusores en una turbina de eje horizontal o vertical (Khan et al., 2009). ....	25
Figura 6. Turbina Gorlov de eje horizontal (Gorban' et al., 2001; Zamora, 2012). ....	26
Figura 7. Ubicación de la zona de estudio. ....	31
Figura 8. Esquema del acuífero kárstico de la Península de Yucatán .....	32
Figura 9. Esquema de delimitación del anillo de cenotes de Celestún-Dzilam de Bravo (Enríquez et al., 2013). ....	33
Figura 10. Esquema del anclaje para las mediciones del manantial Xbuya-Ha; adaptada de (Vera Manrique, 2012). ....	34
Figura 11. Posición de los componentes del corrientímetro Vector. Las componentes de velocidad se orientan como sigue: $V_x$ (Norte-Sur), $V_z$ (arriba-abajo): la caverna se orienta hacia el norte (en dirección costa fuera) por lo que el flujo de salida tiene sólo esas dos componentes. ....	35
Figura 12. a) Nivel del mar; b) y c) Componentes $V_x$ (norte-sur) y $V_z$ (arriba-abajo) de la velocidad de salida del manantial Xbuya-Ha en época de lluvias y después del paso del huracán Ike. ....	43
Figura 13. Variaciones del nivel del mar en el manantial Xbuya-Ha; b) y c) componentes $V_x$ (norte-sur) y $V_z$ (arriba-abajo) de la velocidad de salida del manantial Xbuya-Ha durante la época de sequías. ....	44
Figura 14. Velocidad total del flujo del manantial Xbuya-Ha. ....	44
Figura 15. Relación entre el nivel del mar y la velocidad total de la descarga en el manantial Xbuya-Ha en a) época de lluvias, b) después del paso del huracán Ike y c) en época de sequías. ..	45
Figura 16. a) Serie de tiempo de la velocidad del flujo del manantial y b) densidad de poder espectral de la serie de tiempo. ....	46
Figura 17. Velocidad total del flujo del manantial Xbuya Ha. ....	47
Figura 18. Potencial máximo extraíble evaluado para la descarga de agua del manantial Xbuya-Ha en época de lluvias del año 2008. ....	47
Figura 19. Potencial máximo extraíble evaluado para la descarga de agua del manantial Xbuya-Ha en un evento meteorológico (huracán Ike) ocurrido el 11 de septiembre del 2008. ....	48
Figura 20. Potencial máximo extraíble evaluado para la descarga de agua del manantial Xbuya-Ha en época de secas del año 2009. ....	48

Figura 21. a) Extracción de un ciclo de marea viva/muerta de las variables de profundidad y velocidad total del manantial Xbuya Ha. b) Potencial máximo extraíble de un ciclo de marea viva/muerta del manantial Xbuya-Ha. ....	50
Figura 22. Instalación de la microturbina Gorlov en el manantial Xbuya-Ha. ....	50

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencial de generación eléctrica 2016 (GWh/a), evolución de la capacidad a instalar y generación con ER en el período 2017-2031 .....	9
Tabla 2. Tecnologías: Convertidores de energía de olas .....	14
Tabla 3. Tecnologías para obtención de energía: del rango de marea y de corrientes marinas.....	21

## INTRODUCCIÓN

La problemática energética es una preocupación a nivel mundial por los impactos ambientales que genera principalmente la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural, entre otros) o por energía nuclear. Es por ello que en las últimas décadas se opta por crear, generar y producir energías renovables amigables con el medio ambiente. Entre las energías renovables, una opción es la que se puede obtener de los océanos, a partir de corrientes marinas, ascenso y descenso de las mareas y oleaje, y de gradientes de temperatura y de salinidad.

El océano cubre el 71% de la superficie del planeta y contiene una gran cantidad de energía. Aunque al día de hoy la energía del océano ha sido poco aprovechada (debido principalmente al alto costo en su producción y a las escasas políticas públicas y gubernamentales para extraerla), el avance en el desarrollo tecnológico que se está logrando en la actualidad podría lograr que en un futuro los océanos contribuyan mayoritariamente a satisfacer la demanda energética.

Hoy en día ha crecido un interés en la energía por corrientes marinas, debido a las mejoras en los dispositivos que se utilizan para la extracción de energía cinética de las corrientes marinas (del flujo de agua) para producir electricidad. Entre los dispositivos más utilizados comercialmente están las turbinas, que pueden ser de eje horizontal, vertical o cruzado.

El objetivo de este trabajo es obtener el potencial energético de una descarga de agua subterránea submarina (DASS) ubicada en el mar costero de la Península de Yucatán y estimar la energía que podría adquirirse de ese sitio con una microturbina Gorlov. Este dispositivo se seleccionó a partir de un estudio donde se identificaron las diversas tecnologías existentes para obtener energía de las corrientes de marea y de corrientes marinas. Por otro lado, se analizaron datos de las características del flujo de la DASS medidos en campo. Con la caracterización de la descarga, se consideraron turbinas de eje horizontal, vertical y cruzado para estimar el potencial energético que podría extraerse. Los resultados indicaron que la mejor opción para un sitio con las características del sitio estudiado es la turbina Gorlov, que es versátil, puede ser colocada tanto vertical como horizontalmente dentro de una corriente, su ángulo de torsión tiene la capacidad de arrancar sin necesidad de fuerzas externas y se encuentra disponible a nivel comercial.

La presente tesis se organiza en cinco capítulos, de los cuales el primero aborda la problemática energética, estableciendo los objetivos de este estudio. En el segundo capítulo, se presenta el marco teórico. La tercera parte, aborda los aspectos metodológicos, incluyendo la descripción de la zona de estudio y en el cual se describen las mediciones, el procesamiento y el análisis de los datos de campo, así como también las formulaciones para el cálculo del potencial energético de este sitio. La cuarta sección de la tesis contiene los resultados de esta investigación y, por último, el capítulo cinco presenta las conclusiones del proyecto.

## CAPITULO 1. EL PROBLEMA A INVESTIGAR

Existen problemáticas serias asociadas a la producción de energía eléctrica y dos de las más preocupantes son la capacidad de cubrir la demanda energética a toda la población que la requiere y los efectos dañinos de los procesos con los que se genera la energía eléctrica.

El primer problema, relacionado con la insuficiencia energética resulta de la forma de vida de la humanidad y de la sobrepoblación humana, considerando que la energía eléctrica es la principal herramienta utilizada en muchas actividades antropogénicas (cocinar, transporte, comunicación, salud, entre otras). La elevada demanda limita su disponibilidad en gran parte de la población, y como en casi todos los ámbitos, la fracción más afectada es la población de menos recursos económicos y/o las poblaciones remotas, alejadas de las grandes ciudades.

La segunda problemática, que tiene que ver con las consecuencias ambientales de la energía, es la más preocupante ya que el planeta entero ha modificado su funcionamiento físico al grado de que el cambio generado en el clima está llegando al punto de ser irreversibles y potencialmente alarmante. Esto es debido a que la producción de energía eléctrica, ha generado la emisión de gases de efecto invernadero mayormente generados por la quema de combustibles fósiles, interferencia en los procesos de fotosíntesis, lluvia ácida, radiación por energía nuclear en accidentes de reactores, desbordamiento de presas en las hidroeléctricas, entre otros (Andrews & Jelley, 2017; Menéndez, 2011; Riba, 2013).

Hoy en día la población mundial crece rápidamente y se estima que para el año 2050 habrá 9,700 millones de personas (United Nations, 2017). Es de suponer que el consumo, demanda, producción y conflictos de energía seguirán en aumento, y entre las medidas adoptadas y en crecimiento está la búsqueda de alternativas de Energías Renovables (ER de aquí en adelante) que sean amigables con el medio ambiente.

A nivel mundial se utilizan ER tales como: energía solar fotovoltaica (FV), energía eólica, energía por concentración solar térmica (CSP), energía geotérmica, energía de biomasa, energía hidroeléctrica y energías oceánicas (energía de mareas, por corrientes marinas, por conversión térmica (OTEC), por gradiente salino y del oleaje). Éstas energías pueden ser abundantes, dependiendo de la región en el planeta y podrían ser inagotables si su uso es adecuado, por lo que si se impulsa la optimización de los desarrollos tecnológicos para obtenerlas, podrían ofrecer un aprovechamiento eficiente que ayude a satisfacer la demanda energética (Andrews & Jelley, 2017; Díaz, 2015; SENER, 2017b).

En la actualidad se promueve diversificar la investigación en más fuentes de energía renovable, ya que en los últimos años ha estado muy enfocada en la energía solar y la energía eólica.

Esta contribución presenta cómo es posible generar energía eléctrica de una DASS por medio de una microturbina Gorlov, instalada de forma que se maximice el potencial energético de la corriente de la DASS y que por medio de un generador suministre energía eléctrica.

Al día de hoy no hay estudios que consideren este tipo de sitios (descargas submarinas o DASS) como opciones para obtener energía. Sin embargo, localidades como la que se presenta en este estudio podrían ser clave para el monitoreo de una gran variedad de aspectos que en la actualidad son de gran importancia en zonas costeras (p.e. monitoreo de calidad del agua, monitoreo de salida de nutrientes o contaminantes al mar costero, monitoreo de intrusión salina del mar costero hacia el acuífero, entre otros). La evaluación del potencial energético en este sitio refleja la posibilidad de adquirir energía eléctrica, que podría entre otras cosas destinarse para auto-abastecerse de un sistema de monitoreo.

El objetivo general de esta investigación es cuantificar el potencial energético de una descarga de agua subterránea submarina (DASS), situada en el mar costero de Yucatán mediante una microturbina Gorlov. Los objetivos particulares son el análisis y procesamiento de mediciones de velocidad del flujo medidos en campo, identificar qué tipo de turbina se adapta a las condiciones de la DASS, identificar las variaciones estacionales y las variaciones por marea de la velocidad del flujo de la DASS, cuantificar el potencial energético para determinar la conveniencia y utilidad de aprovechar en sitios de esa naturaleza la energía cinética de la descarga.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ENERGÍAS RENOVABLES

Las principales formas de ER que destacan hoy en día en el mundo son;

- a) *la energía solar* con dos alternativas para generar electricidad: la conversión térmica de concentración (CPS) y la fotovoltaica (FV). En el año 2016 según las estimaciones de (REN21, 2017) la energía FV fue líder a nivel mundial con una producción de 303 GW y una instalación de 31.000 paneles/hora. Se logró cubrir el 2% o más de su demanda de energía eléctrica en 17 países, lo que implicó una disminución en los precios de esta energía. Sólo China logró instalar cerca de 34 GW de capacidad<sup>1</sup> solar, otros países con un importante crecimiento son EE.UU. (11 GW); Japón (8 GW) y la India (4 GW). En Europa la capacidad solar alcanzó los 104 GW, con mayores aportaciones de Alemania y el Reino Unido. Respecto a la CSP, los marcos jurídicos se flexibilizaron en países con reservas limitadas de gas y petróleo (REN21, 2017);
- b) *la energía eólica*, cuya capacidad a finales del año 2016 fue de 487 GW, además de que en más de 90 países presenciaron actividad comercial de esta energía, y en 29 países con una implementación de 1 GW en operación. El viento una buena opción para generar electricidad de bajo costo mediante la fabricación de turbinas comparada con la tecnología que se usa para la energía solar FV, teniendo como última tendencia los parques off-shore (parques eólicos que se ubican en el mar) que cuentan con alta rentabilidad debido al aprovechamiento fuerte y constante del viento en el mar (REN21, 2017);
- c) *la energía hidráulica* utiliza fundamentalmente centrales hidráulicas y minihidráulicas en presas teniendo como ventaja que puede ser constante y previsible (Schallenberg et al., 2008) . Se estimó que la adición global a la capacidad hidroeléctrica en 2016 fue de al menos 25 GW, en tanto que, el almacenamiento creció más de 6 GW, con capacidad total que alcanza aproximadamente 1,096 GW. Los principales países con capacidad hidroeléctrica son China con 28%, Brasil, Estados Unidos y Canadá con el 9%, la Confederación Rusa e India con el 4% y el resto del mundo un 40%. En China su capacidad total a finales de 2016 sumó un total de 305 GW (REN21, 2017);
- d) *la bioenergía*, se produce a partir de la transformación de la materia orgánica mediante un proceso de combustión, digestión y descomposición de la misma, que

---

<sup>1</sup>Capacidad: Se refiere a la potencia máxima que puede suministrar energía eléctrica a una unidad generadora, o a una central de generación, se expresa en MW o kW (SENER, 2012).

genera biocombustibles como bioetanol, biodiésel, biogás (formado por metano y dióxido de carbono). A nivel mundial en el año 2015 sufrió un declive la producción de biodiésel recuperándose en el año del 2016 con el uso de aceite vegetal hidrotratado (HVO, por sus siglas en inglés) y de biometano en el transporte. Aumentando un 6% tanto la capacidad como la generación, conservando el desarrollo constante en su producción. La capacidad mundial con bioenergía fue de 112 GW en 2016 (REN21, 2017);

- e) *la energía geotérmica* se puede aprovechar en la actualidad de dos formas: para calentamiento y enfriamiento o para producir electricidad. Debido a la diferencia de temperatura entre la superficie terrestre y la de su interior a diferentes profundidades pueden ser aprovechados los yacimientos geotérmicos. Para altas temperaturas (superiores a 150 °C) se aprovecha la salida de vapor para accionar turbinas para la producción de energía eléctrica. Para baja temperatura (entre 30°C y 150 °C) su utilización es para calentamiento del agua subterránea de los acuíferos profundos y para el enfriamiento con temperaturas de muy baja temperatura (15 °C) se utilizan bombas de calor geotérmicas. Las plantas geotérmicas trabajan tanto para la producción de electricidad como para la producción térmica, siendo un factor de capacidad mucho mayor que otras energías renovables (Schallenberg et al., 2008). A nivel mundial, la capacidad total por energía geotérmica fue de 13.5 GW en el año 2016 (REN21, 2017).

## **2.2 PANORAMA MUNDIAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

### **2.2.1 PERSPECTIVA DE LAS ER A NIVEL INTERNACIONAL**

El mercado energético a nivel internacional se divide principalmente en tres grandes segmentos: 1) transporte, 2) calentamiento y enfriamiento y 3) electricidad. El desarrollo tecnológico relativo a la energía para los dos primeros segmentos es todavía muy lento en comparación con la velocidad a la que está avanzando la producción y generación de electricidad por medio de ER (REN21, 2017).

En el sector transporte se están ya utilizando más vehículos eléctricos, que en su mayoría se alimentan de electricidad proveniente de combustibles fósiles o energía nuclear. Hay, sin embargo, interés para que sean alimentados con energía renovable, y se está planteando la utilización de éstas energías en el transporte ferroviario. En 2016 diversas vías ferroviarias implementaron proyectos nuevos para generar su propia electricidad por medio de ER (por ejemplo, turbinas eólicas en túneles de las líneas de ferrocarril y paneles solares en las estaciones de ferrocarril) (REN21, 2017).

En el sector 2 el calentamiento (de agua, preparación de comida, calefacción, y procesos industriales) representó más del 50% del consumo mundial de energía eléctrica renovable y no renovable en 2016. De la producción eléctrica por ER en ese mismo año el 25 % fue empleada para la producción de calor; de esta producción, más de dos tercios se generaron de biomasa tradicional, con contribuciones menores de energía solar térmica y geotérmica. Por su parte el enfriamiento, que en su mayoría es realizado por aparatos eléctricos, representa sólo el 2% del consumo mundial de electricidad. Hasta ahora los aparatos de enfriamiento basados en energía térmica renovable no han logrado satisfacerla la demanda (REN21, 2017).

Del sector 3 (electricidad), cada año se publica un informe anual de la Situación Mundial de las Energías Renovables (GSR por sus siglas en inglés) a través de REN21, una red multidisciplinaria que abarca al sector público y privado. En el informe de REN21 de 2017 se estimó que a finales del año 2016 la producción de energía eléctrica a través de energía no renovables fue del 75.5%, mientras que para las ER fue del 24.5% (16.6% en energía hidroeléctrica, 4% en energía eólica, 2% en energía de biomasa, 1.5% de energía fotovoltaica, 0.4% en energía geotérmica y conversión térmica, entre otras)(REN21, 2017).

En el informe de la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA) “Renewable Energy Capacity Statistics 2017” se estima que la capacidad total de generación eléctrica con ER fue de 2,011,332 MW, incluyendo energía hidráulica en 2016 (IRENA, 2017). Por otra parte, según REN21 2017, las adiciones a la capacidad instalada de energía renovable alcanzaron un récord en 2016, con 161 GW añadidos. Los países con mayor capacidad de energía fueron China, Estados Unidos, Brasil, Alemania y Canadá. La energía solar FV fue la estrella del 2016 al instalarse el 47% de la capacidad adicional total, mientras en segundo



lugar fue la energía eólica con un 34% y el tercer puesto fue la energía hidráulica con un 15.5%. Por consiguiente, ha disminuido el costo de la electricidad convencional al incrementar la energía renovable solar FV en países como Argentina, Chile, India, entre otros, reduciendo el precio hasta los \$0.03 dólares por kilowatt (kW).

Sin embargo la transición de la energía eléctrica no está siendo lo suficientemente rápida para lograr las metas del acuerdo firmado en el 2015 en París, en el que se manifiesta la intención de reducir las emisiones del efecto invernadero de forma que la temperatura media mundial no aumente más de 2 °C y llegar a un límite de 1.5 °C, de aquí al 2020. Desafortunadamente, han disminuido las inversiones en las ER, y éstas, sólo se dirigen al sector de la energía eólica y solar FV.

Así mismo, el progreso de los sectores de transporte, calentamiento y enfriamiento no ha avanzado debido a los altos costos iniciales, que no son atractivos en comparación con los bajos precios de los combustibles fósiles (REN21, 2017).

## **2.2.2 PERSPECTIVA DE LAS ER EN MÉXICO**

El 17 de febrero de 2018 México , se convirtió oficialmente en el 30º país miembro de la Agencia Internacional de Energía y el primer miembro en América Latina. La membresía se produjo después de que se firmara y validará por el Senado mexicano el Acuerdo Sobre un Programa Internacional de Energía (IEP) (IEA, 2018).

Por medio de la Secretaría de Energía (SENER) y del Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT), más de 120 instituciones educativas, empresas y centros de investigación han consolidado los Centros Mexicanos de Innovación (CEMIE's), enfocados en el aprovechamiento energético de las ER (energía geotérmica, solar, eólica, bioenergía y energía del océano) a través del Fondo de Sustentabilidad Energética que se orienta en alinear las necesidades para su aprovechamiento, consolidación y vinculación de las capacidades científicas y tecnológicas existentes en estos temas.

En el informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) junto con la SENER (Secretaría de Energía) se visualizó una perspectiva del uso de las ER hacia el 2030 y se desarrolló una ruta global de energía renovable llamada REmap 2030 que muestra de forma realista y rentable las políticas adecuadas y de inversión a gran escala del aumento de las ER estimando un 21% en 2030 del consumo total de energía. Esto ayudaría a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y generaría ahorros netos de 1,6 mil millones de dólares anuales en costos del sistema de energía. Para México se podría generar hasta el 46% de su electricidad, o 280 TWh, de fuentes renovables cada año, con un potencial de 92 TWh de energía eólica al norte y sur del país, 66 TWh de energía FV, 4 GW de capacidad por bioenergía, 4.5 GW de capacidad por energía geotérmica y 26 GW de capacidad por energía hidroeléctrica a pequeña y gran escala (IRENA, 2015).

### 2.2.3 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS ER EN MÉXICO

Para el periodo 2006 -2016 la fuente con mayor crecimiento a nivel nacional fue la energía solar FV, con un aumento de capacidad instalada<sup>2</sup> de 17.6 MW a 388.6 MW y de generación de energía eléctrica<sup>3</sup> de 19 GWh a 215 GWh respectivamente, debido a la localización geográfica del país (entre 15° y 35° de latitud) permite tener un promedio de irradiación solar mínimo de 3 kWh/m<sup>2</sup>, un máximo de 8.5 kWh/m<sup>2</sup> y un promedio diario de 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/día (SENER, 2012, 2017a). Respecto a la energía solar CPS para abril de 2016 entró en operación la central que utiliza espejos parabólicos para captar la irradiación del sol y convertirla en calor, con una capacidad instalada de 394 MW en el Estado de Sonora.

Para el año 2016 mediante la Ley de la Industria Eléctrica, la Ley de Transición Energética y el sector privado, la energía eólica incrementó su capacidad a una tasa media anual de 72.5%, para ubicarse en 10,462.6 MW; la energía hidráulica no logro un crecimiento significativo debido a las condiciones atmosféricas, pero sigue siendo una de las mejores alternativas para la generación de energías limpias en el país contando con pequeñas, mini y micro centrales hidroeléctricas  $\leq 30$  MW que aportaron una capacidad instalada de 12,589 MW y de generación de 30,909 GWh; la energía por biomasa para el período de 2006-2016 incremento el desarrollo de biocombustibles con una capacidad instalada equivalente a 798.3 MW por bagazo de caña y 83.1 MW por biogás, con una generación de energía eléctrica con bagazo de caña de 1,276.4 GWh y 194.8 GWh con biogás (SENER, 2017a).

Si bien, la energía geotérmica ha disminuido en un 0.5% anual en el período del 2006-2016. México ya tiene la quinta capacidad instalada de energía geotérmica más grande del mundo después de los Estados Unidos, Filipinas, Indonesia y Nueva Zelanda. En el año 2016 su capacidad instalada total fue de 909 MW, mientras que la generación de energía fue de 6,148 GWh (SENER, 2017a).

---

<sup>2</sup> Capacidad instalada: Es el potencial generado por una central, un sistema local o un sistema interconectado, sin embargo el equipo que se ha construido puede estar o no estar operando (REN21, 2017).

<sup>3</sup> Generación de energía eléctrica: Producción de energía eléctrica y/o calor útil de una fuente primaria, como el viento, la radiación solar, biomasa, etc. (REN21, 2017).

## 2.2.4 POTENCIAL DE LAS ER EN MÉXICO

En México, la información sobre el potencial que tienen las ER, se almacena en el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL), clasificándolo en: a) el potencial probado es el que cuenta con estudios técnicos y económicos que comprueban la factibilidad de su aprovechamiento, b) el potencial probable es el que comprueba la presencia de los recursos, pero no la factibilidad técnica y económica de explotación, c) el potencial posible se refiere el potencial teórico de los recursos. El potencial de generación eléctrica en México en el año 2016 se presenta en la Tabla 1 para las diferentes ER.

Para el período 2017-2031 se prevé un alto crecimiento en la capacidad y generación eléctrica en todas las ER del país, considerando diversos proyectos que se encuentran en desarrollo, ver Tabla 1 (SENER, 2017a).

Tabla 1. Potencial de generación eléctrica 2016 (GWh/a), evolución de la capacidad a instalar y generación con ER en el período 2017-2031 (Fuente: SENER, 2017a).

Tipo de energía renovable	Potencial (GWh)	Período	Capacidad a instalar (MW)	Generación (GWh)
Solar	Probado: 25,052 Posible: 6,500,000	2017 2031	539 7,380	539 13,396
Eólica	Probado: 20,104 Posible: 87,600	2017 2031	4,329 17,233	13,863 67,581
Hidráulica	Probado: 4,920 Probable: 23,028 Posible: 44,180	2017 2031	12,604 14,270	31,930 38,865
Bioenergía	Probado: 3,316 Probable: 45,207 Posible: 52,013	2017 2031	3,412 12,666	956 2,239
Geotérmica	Probado: 2,160 Probable: 45,207 Posible: 52,013	2017 2031	920 2,146	3.262 15,160

## 2.3 ENERGÍAS OCEÁNICAS

Hay una gran cantidad de energía en el océano tanto potencial como cinética. Muchos factores inciden en las fuerzas responsables de la circulación general del océano, siendo principalmente el viento y las mareas los principales forzantes de la energía cinética del flujo medio, y la estructura y densidad determinan la energía potencial (Thorpe, 2007).

Debido a que el océano cubre más del 71% de la Tierra, éste ha sido reconocido como un recurso energético renovable vasto. La energía que existe en los océanos se encuentra en los gradientes de temperatura (energía térmica), en los gradientes de salinidad (energía del gradiente salino), en las olas y en las corrientes (energía cinética) (CEMIE-Océano, 2017). Además, en el océano hay recursos energéticos en diferentes elementos químicos y biológicos (Ben Elghali et al., 2007).

Al día de hoy, existe (y se encuentra en desarrollo) tecnología para extraer la energía del océano de olas (Ulloa, Olivares Torres, Díaz Maya, Hernández Adame, & Ortega Izaguirre, 2018), mareas (Mejía-Olivares et al., 2018), corrientes marinas (Mariño-Tapia et al., 2018), energía oceánica térmica (Garduño Ruiz et al., 2017), energía por gradientes salinos (osmosis y electrodiálisis inversa) (Enríquez, Chiappa, Roldán, & Marín-Coria, 2017) y de biomasa marina (Ben Elghali et al., 2007).

Sin embargo, el aprovechamiento de la energía oceánica requiere el creciente desarrollo tecnológico en diseño técnico y funcionalidad de las turbinas y dispositivos emergentes que generan certidumbre en la factibilidad y aprovechamiento óptimo energético de los océanos. Se ha estimado que los océanos poseen alrededor de 5,000 GW de potencia de generación, aunque sólo se puede aprovechar una porción de esta energía (Ben Elghali et al., 2007; SENER, 2012).

A finales del año 2016 la capacidad en operación fue aproximadamente de 536 MW y más del 90% estuvo representado por dos instalaciones de presa de mareas: la planta Sihwa de 254 MW en República de Corea (finalizada en 2011) y 240 MW en la central de marea La Rance en Francia (construida en 1966) (REN21, 2017). Debido al joven desarrollo de la tecnología para energías marinas, muy pocas instalaciones comerciales de energía oceánica han sido construidas hasta la fecha (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

La industria en mareas es la que se encuentra más activa en términos de la creación e instalación de nueva tecnología, en el año 2016 lo más destacable fue la instalación de la turbina SR2000 de 2 MW, siendo al 2018 la más grande del mundo; consta de dos turbinas de eje horizontal montadas en una plataforma flotante. Gracias a esta turbina, en 2017 hubo un aumento de capacidad de extraer más de 17 MW globalmente de la energía de mareas (OES, 2017; REN21, 2017).

La energía del oleaje también sigue progresando. Algunos de los logros del año 2016 fueron: la instalación de un convertidor de energía flotante que está generando 30 kW de la empresa Oceantec en España; el comienzo del funcionamiento de la planta en Suecia de la compañía Sotenäs que consta de absorbedores puntuales generando 1 MW, siendo la primera serie de convertidores de energía de onda múltiple en operación en el mundo; la instalación en China de un dispositivo de conversión de energía térmica de 10 kW, así como otros dispositivos con diferentes métodos para maximizar la energía proveniente de las olas. Por todo lo anterior, durante el 2017 se obtuvo un despliegue de 8 MW de energía del océano internacionalmente (OES, 2017; REN21, 2017).

La capacidad acumulada de energía oceánica se ha duplicado en todo el mundo, pasando de menos de 12 MW en 2016 a más de 25 MW en 2017. Se espera tener 300 GW de capacidad instalada en todo el mundo para 2050 (OES, 2017).

Para establecer un camino próspero hacia el mercado europeo en la energía de los océanos la Comisión Europea publicó una hoja de ruta tecnológica (TRM) de la energía oceánica en el año 2016 (incluyendo a México, quien trabajó en conjunto con los CEMIE's) para obtener mejores resultados en las inversiones de los proyectos (OES, 2017).

México cuenta con un potencial probable de 1,057 GWh/año, se predice por medio del TRM que para el año 2030 la energía oceánica pueda producir de 500 a 1000 MW de capacidad eléctrica instalada. Sin embargo, hasta el momento presente (febrero del 2019), no existe en México ningún desarrollo piloto o comercial de centrales de electricidad en operación de alguna de las formas de energía oceánica. No obstante, se han desarrollado diversos prototipos de prueba en diferentes instituciones. Por ejemplo en 2012 se puso en marcha un proyecto piloto para generar energía por olas con una capacidad de 3 MW en Baja California; en diciembre de 2015 la empresa finlandesa AW-Energy Oy, líder mundial en el desarrollo de energía de las olas firmó un memorándum de entendimiento con la empresa mexicana de ER ENAL para el diseño y desarrollo de un parque de olas de 10 MW en las costas del Pacífico en México; durante ese mismo año, la SENER promovió un proyecto en el canal de Cozumel para aprovechar las corrientes del océano (SENER, 2012, 2017b).

En el año 2017 se creó el CEMIE-Océano que coordinó el trabajo de muchas instituciones, academias y empresas mexicanas en la investigación y desarrollo de tecnología aplicada para el aprovechamiento de la energía oceánica ( <https://cemieoceano.mx/> ). El proyecto inicial se encuentra trabajando cuatro líneas estratégicas:

- I. Energía mareomotriz: Se enfoca en la evaluación de recursos, que incluye el desarrollo de un atlas nacional de potencial energético y estudios socio-económicos-ambientales en las regiones con mayor potencial de energía; otra componente de la línea es la caracterización regional, la cual incluye el desarrollo del potencial de la energía mareomotriz e hidrocínética en el Golfo de California, el

diseño de electrolizadores de hidrógeno para el almacenamiento de energía y la evolución del rendimiento.

- II. Energía de olas: Busca la caracterización de la energía de las olas, que incluye el diseño conceptual de WEC (convertidores de energía de olas), estudios teóricos y numéricos, y experimentos de laboratorio con prototipos de pequeña y gran escala. Este será un dispositivo diseñado para aguas mexicanas donde se requieren dispositivos de alta eficiencia.
- III. Energía por gradiente salino: Se focaliza en la evaluación de los recursos, que incluye la elaboración de un atlas nacional de campo de salinidad para encontrar sitios con potencial de explotación y la realización de estudios socioeconómicos y ambientales en las áreas con mayor potencial; también va a diseñar un prototipo a partir de materiales y técnicas de laboratorio y la adaptación de las capacidades y recursos nacionales existentes.
- IV. Energía por gradiente térmico: Se centra en la evaluación de recursos, con la elaboración de un atlas nacional de campos de temperatura, la realización de estudios de viabilidad, el seguimiento de gradientes térmicos en sitios potenciales con cadenas de termistor y la evaluación de la eficiencia, los impactos técnico-ambientales y socioeconómicos.

### **2.3.1 ENERGÍA POR OLAS (UNDIMOTRIZ)**

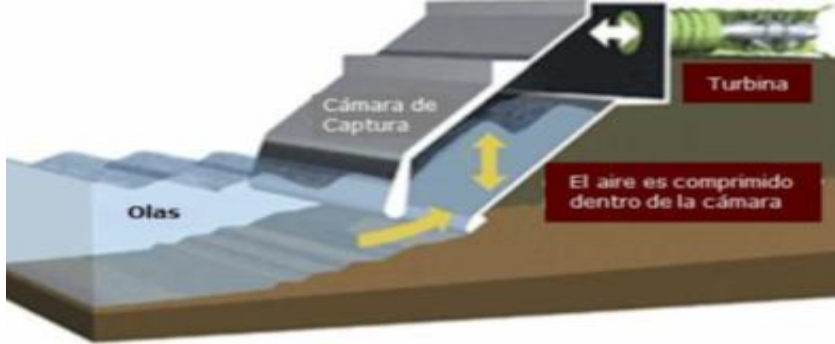


Esta energía se basa en el aprovechamiento energético generado por el oleaje; este se genera por la acción del viento que sopla sobre la superficie del océano, que a su vez es consecuencia de las diferencias de presión atmosférica provocadas por la radiación solar. La energía extraída depende de la intensidad del oleaje, así como también de la intensidad del viento, duración y longitud de la ola (Condes, 2014).

El potencial teórico mundial de la energía del oleaje se ha calculado en 2 mil TWh/año. Los convertidores de energía del oleaje (CEO), conocidos como WEC (Wave Energy Converter) son diversos y suelen aprovechar el cambio de la superficie del mar (sobreelevación, rotación y traslación) para mover componentes que se conectan a generadores eléctricos (Drew et al., 2009; SENER, 2017b).


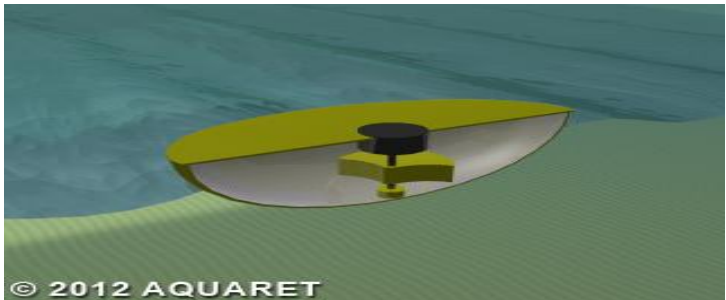
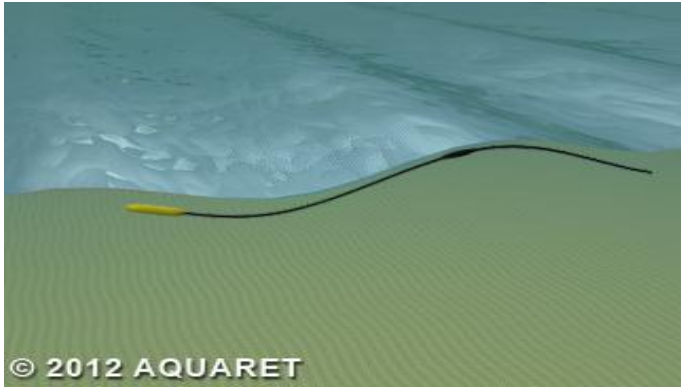
En el CEMIE- Océano se están desarrollando dos dispositivos de energía undimotriz para ser instalados en El Sauzal, Baja California y en Lázaro Cárdenas, Michoacán. El dispositivo que se colocará cerca de las instalaciones del puerto El Sauzal, Baja California, es de una capacidad planificada de 100-200 kW. Mediante el escalado, pruebas y experimentos de laboratorio se estima que el dispositivo puede llegar a producir 1.0 MW (SENER, 2017b).

En la tabla 2 se identifican los principales convertidores de energías de olas para el aprovechamiento de la energía undimotriz:

Tabla 2. Tecnologías: Convertidores de energía de olas

Método	Descripción		Ejemplos de tecnología
<p>Columna de Agua Oscilante (OWC)</p>	<p>Es una estructura semi-sumergida fija o flotante, una columna de agua se mueve ascendente y descendente con el paso de las olas, produciendo una variación de presión impulsando al aire a través de la turbina e impulsar el generador</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HydroAir</li> <li>• greenWAVE</li> <li>• WAG Buoy</li> <li>• TRETON</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• LIMPET – 500 kW (Condes, 2014)</li> </ul>
<p>Atenuador</p>	<p>Son generalmente largas estructuras flotantes alineadas paralelamente a la dirección de la ola. Inducen un movimiento oscilatorio, el cual es soportado por cilindros hidráulicos que bombean fluido hidráulico de alta presión a través de un motor, para generar electricidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dexawave</li> <li>• Flow</li> <li>• SeaWEED</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelamis-750kW (Drew et al., 2009)</li> </ul>
<p>Convertidores de Oleaje de Ondas Oscilantes (OWSC)</p>	<p>Se encuentran cerca a la costa (10 a 15m), extrae energía del movimiento horizontal del oleaje, esta constituido por una aleta plana articulada sobre una cimentación que se fija en el fondo marino, la aleta rota sobre su articulación bajo la acción de las olas que inciden de manera perpendicular a la misma.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langlee System</li> <li>• WaveRoller</li> <li>• SurgeWEC</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oyster 800 – 800 kW (Drew et al., 2009)</li> </ul>



<p>Absorbedor puntual</p>	<p>Consiste en una estructura puntual flotando en la superficie del agua y un generador lineal colocado en el fondo marino. Absorbe la energía de las olas de todas las direcciones.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rig Drive</li> <li>• Aimmer III</li> <li>• Wave Pump Rig</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power Buoy - 40kW (Drew et al., 2009)</li> </ul>
<p>Masa Giratoria</p>	<p>Para captar la energía se realiza mediante dos formas de rotación; por el movimiento del sistema y de las olas. Este movimiento impulsa un peso excéntrico o un giroscopio. En ambos casos, el movimiento esta unido a un generador eléctrico en el interior del sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penguin</li> <li>• SEAREV</li> </ul>	 <p>© 2012 AQUARET (EMEC,2017)</p>
<p>Otros</p>	<p>Existen otros dispositivos que utilizan el diferencial de presión (abultamiento de ola, dispositivos de diferencial de presión sumergida), el rompimiento de la ola (Desbordamiento) y otros que están en desarrollo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wave Dragon</li> <li>• mWave</li> <li>• Turbo Outburst Power</li> </ul>	 <p>© 2012 AQUARET (EMEC, 2017)</p>

Fuente (CEMIE-Océano, 2017; Condes, 2014; Drew et al., 2009; EMEC, 2018; SENER, 2017b).

### 2.3.2 ENERGÍA OCEÁNICA TÉRMICA (OTEC)

Para esta energía se utiliza la diferencia de temperatura entre el agua cálida de la superficie  $\sim 20^{\circ}\text{C}$  y agua de menor temperatura ( $\sim 4^{\circ}\text{C}$ ) que en los océanos se encuentra a profundidades de entre 800 a 1000 metros (Condes, 2014; Garduño Ruiz et al., 2017; SENER, 2017b).

Las plantas OTEC constan de tres ciclos de conversión:

- **Abierto:** Una cámara de baja presión se utiliza para vaporizar el agua de mar caliente. El vapor formado ejerce presión que acciona una turbina que genera electricidad. El agua fría enviada por una tubería desde capas profundas del océano, condensa el vapor, generando agua desalinizada para consumo o riego (Condes, 2014).
- **Cerrado:** Se utiliza agua de mar caliente para hervir un líquido con un punto de ebullición bajo, como propano o amoníaco. Este fluido se transporta para su evaporación a presiones adecuadas para accionar la turbina; el agua fría del mar pasa por un condensador con este fluido vaporizado que se transforma en líquido (Condes, 2014).
- **Híbrido:** Esta tecnología combina ambos ciclos.

Los beneficios que aporta las instalaciones de plantas de OTEC incluyen la producción de agua potable y el uso de agua fría para la acuicultura, refrigeración y aire acondicionado de agua de mar. Se han implementado tanto en tierra como flotando en el agua cerca de las costas, siendo la más factible la última (SENER, 2017b).

### 2.3.3 ENERGÍA POR GRADIENTES SALINOS

Esta energía es obtenida por la diferencia en la concentración de sales en el agua. Existen dos métodos para la conversión de la energía producida por el aumento de la entropía: Ósmosis por presión retardada (PRO, Pressured Retarded Ósmosis) y Electrodialisis inversa (RED, Reverse Electrodialysis).

- **Ósmosis por presión retardada (PRO):** Se ponen en contacto dos fluidos con distinta salinidad (p.e. agua de mar y agua de río) separados por una membrana semipermeable, que permite el paso del agua, pero no de la sal. La zona saturada de sal atrae al agua dulce por medio de la membrana aumentando la presión e impulsando la turbina generadora de electricidad (Condes, 2014; SENER, 2017b).
- **Electrodialisis inversa (RED):** Se usan dos membranas de intercambio iónico, una de ellas permite el paso de aniones y la segunda de cationes, por lo que el objetivo es crear una pila compuesta por la dinámica de una corriente iónica y generar un

diferencial de potencial del que puede obtenerse energía (Condes, 2014; SENER, 2017b).

### **2.3.4 ENERGÍA POR MAREAS (MAREOMOTRIZ)**

Las mareas son ondas largas que se mueven periódicamente generadas por la fuerza de atracción gravitatoria que ejercen la Luna y el Sol sobre la Tierra y la fuerza centrífuga (inercia) que genera la rotación de la Tierra (Pinet, 2003). La propagación de esta onda causa que el nivel del mar suba y baje con extraordinaria regularidad, teniendo como cresta la altura máxima del agua denominada pleamar (marea alta) y en caso contrario un valle denominado bajamar (marea baja). Se pueden clasificar en tres categorías basadas en sus períodos y su regularidad; las mareas diurnas tienen un período cercano a un día (alrededor de 25 horas) con una marea alta y una marea baja diariamente. En contraste, las mareas semidiurnas ocasionan dos mareas altas y dos mareas bajas cada día, con período de alrededor de 12 horas. Existen también sitios que presentan un régimen de mareas mixtas, en donde unos días del ciclo lunar (que tiene una duración aproximada de 28 días), las mareas tienen un comportamiento diurno mientras que otros momentos del ciclo la marea es semidiurna (Issitt, 2013; Pinet, 2003; Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

A lo largo de ese ciclo lunar, existe un período denominado “mareas vivas” cuando se producen pleamares más altas y bajamares más bajas que las mareas promedio, que sucede cuando la Luna y el Sol se encuentran alineados con la Tierra (luna llena o nueva) y se produce la mayor fuerza de atracción. Alternando con las mareas vivas, se presenta el período de “mareas muertas” cuando la amplitud de oscilación de la marea es menor (el pleamar es inusualmente “bajo” y el bajamar es inusualmente “alto”), que ocurre cuando la Luna, la Tierra y el Sol se encuentran en cuadratura formando un ángulo recto (luna en cuarto creciente o cuarto menguante) (Issitt, 2013; Pinet, 2003).

Considerando que la marea está asociada a movimientos verticales ascendentes y descendentes (pleamar-bajamar) y que estos movimientos generan gradientes de presión que son una fuerza que genera movimiento de las masas de agua del océano (corrientes de marea), se pueden identificar dos métodos principales para generar electricidad a partir de las mareas (Condes, 2014; Roberts et al., 2016):

- I. **Dispositivos de rango de marea:** A medida de que hay un cambio entre el pleamar y bajamar se generan corrientes de agua, una es denominada corriente de flujo (“flood current”) que ocurre durante la elevación de la marea transfiriendo agua hacia la costa y otra corriente de refluo (“ebb current”) que fluye lejos de la costa (Pinet, 2013);

Para la obtención de la energía potencial de las corrientes de llenante (flood) y vaciante (ebb) se colocan diques o presas en bahías o estuarios para impulsar turbinas y generar electricidad (Ben Elghali, Benbouzid, & Charpentier, 2007; Roberts et al., 2016). Sin embargo, la instalación es difícil porque existe un número reducido de localizaciones donde la diferencia del nivel del agua entre mareas debe de ser de al menos 6 m. La generación de electricidad es de alto costo por la construcción de embalses (Vega de Kuypers & Ramírez Morales, 2014).

Un ejemplo se muestra en la figura 1, que esquemáticamente representa la planta de energía La Rance. La planta La Rance, generó aproximadamente 240 MW en el año 2016 es la instalación más grande de mareas en el mundo. El estuario encerrado del Rio La Rance en Bretaña (Francia) tiene un área superficial de 22 km<sup>2</sup> y sus mareas tienen un rango de 13.5 m (diferencia entre mareas altas y bajas durante el equinoccio) (Ben Elghali et al., 2007).

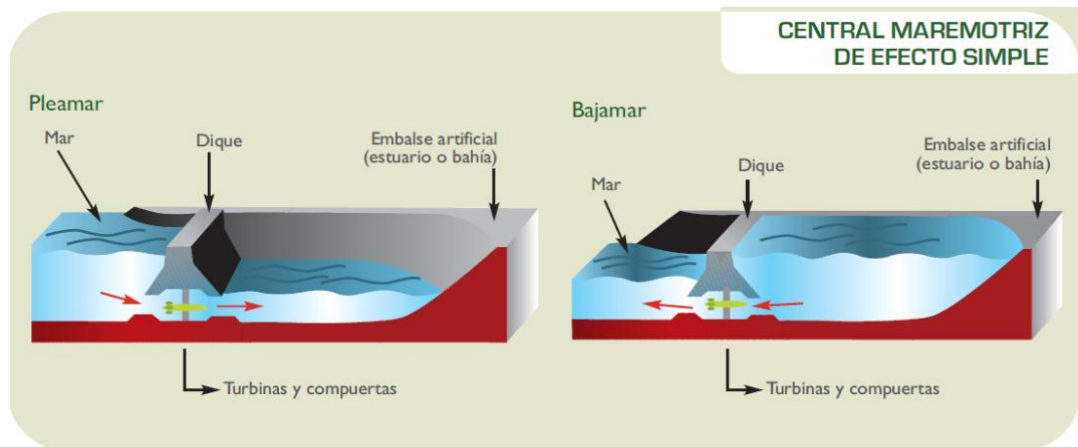


Figura 1. Esquema de una central mareomotriz de efecto simple (Schallenberg et al., 2008)

- II. **Dispositivos de corriente de marea:** Estos utilizan la energía del agua que fluye directamente en las corrientes de marea para generar electricidad. El flujo de corriente de marea es muy predecible, con una precisión del 98% durante décadas, es escasamente afectado por efectos térmicos y de densidad e independiente de las condiciones climáticas prevalecientes tal como niebla, lluvia, viento o nubes que impactan a otros dispositivos.

Es importante destacar que los dispositivos que se implementan para la recolección de la energía cinética de las corrientes de marea son similarmente implementados para la extracción de energía en corrientes marinas (Ben Elghali et al., 2007; Roberts et al., 2016).

### 2.3.5 ENERGÍA POR CORRIENTES MARINAS

Las corrientes marinas tienen múltiples forzantes, entre los que se encuentran el movimiento de rotación de la Tierra, los vientos, las diferencias de presión y las diferencias de densidad (Pinet, 2003). Las grandes corrientes superficiales oceánicas del mundo son depósitos de energía sin explotar, su flujo de energía total se ha estimado en 2.8 a 1.014 Wh (Condes, 2014) y la potencia teórica anual del recurso de corrientes de marea en todo el mundo se ha estimado en el orden de  $10 \times 10^4$  TWh (Mejia-Olivares et al., 2018). Independientemente del origen de las corrientes marinas, la tecnología de captación energética de ellas se basa en transformadores de energía cinética muy similares a las turbinas eólicas.


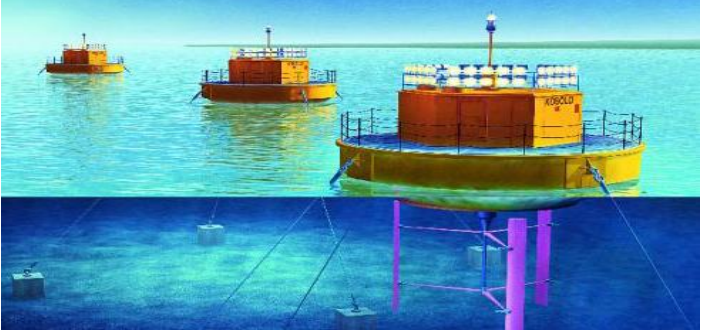
En función la similitud entre las turbinas marinas y las eólicas, parece inevitable realizar una comparación entre la densidad energética del aprovechamiento de ambas. Tomando datos estándar, se puede llegar a las siguientes conclusiones: un viento promedio de 15 m/s posee una densidad de potencia de  $2 \text{ kW/m}^2$ , mientras una corriente marina muy intensa escasamente tendrá una velocidad de 3 m/s (5 veces menos) pero tiene una densidad energética de hasta  $14 \text{ kW/m}^2$  (7 veces más) (Díaz, 2015). Esto se debe a las diferencias físicas entre los fluidos; la densidad del agua de mar es aproximadamente de  $1025 \text{ kg/m}^3$ , comparado con alrededor de  $1.25 \text{ kg/m}^3$  por 1 atm de aire a temperatura ambiente (Roberts et al., 2016). En la figura 2 se muestra una comparación de una turbina eólica con una turbina de marea de la misma potencia.



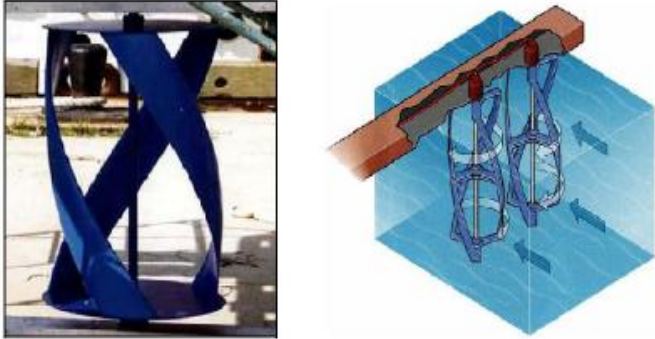
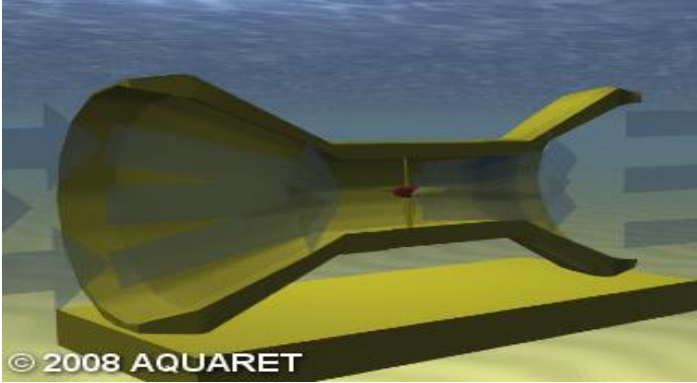

Figura 2. Comparación del tamaño entre una turbina eólica y una turbina de corrientes marinas para obtener 1 MW.

De acuerdo con el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC), existen diversos conversores de energía por corrientes marinas, que se pueden clasificar principalmente como turbinas y no turbinas (Khan et al., 2009) . En la tabla 3 se muestran algunos ejemplos de los principales convertidores de energía para el aprovechamiento de corrientes marinas.

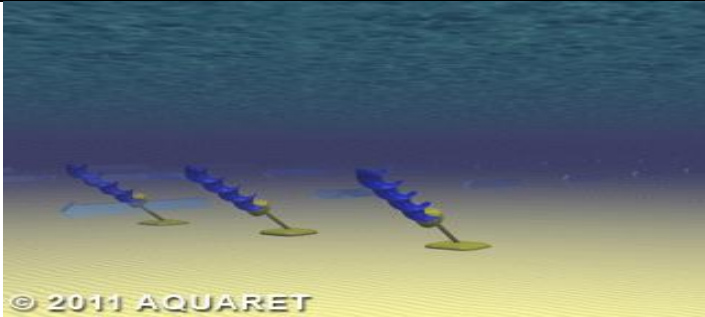
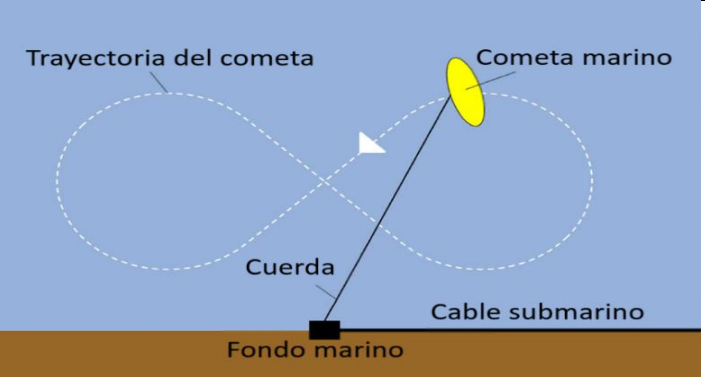
Tabla 3. Tecnologías para obtención de energía: del rango de marea y de corrientes marinas.

	Método	Descripción	Ejemplos de tecnologías /Aplicaciones	
Turbina	Eje horizontal	Están compuestos por un rotor de 2 o 3 álabes, que giran sobre un eje montado horizontalmente. El movimiento cinético de la corriente de agua crea una fuerza de sustentación sobre los álabes, que hacen girar el rotor e impulsan un generador eléctrico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CurrentStar</li> <li>• Cetus Turbine</li> <li>• Hydro-Gen</li> <li>• SeaGen U</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Turbine E-tide -750-1000 kW (Ben Elghali et al., 2007)</li> </ul>
	Eje vertical	Extraen la energía de las mareas de manera similar a las de eje horizontal, con la diferencia que están montadas sobre un eje vertical.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Current Power</li> <li>• Osprey</li> <li>• StreamCube</li> <li>• BlueTEC</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• KOBOLD - 80 kW (Condes, 2014)</li> </ul>



	Eje cruzado (CFT)	Giran alrededor de un eje que es perpendicular a la dirección del flujo. Este eje puede ser posicionado en el plano vertical u horizontal en relación con el flujo, resultando en CFT de eje vertical o CFT de eje horizontal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gorlov Helical Turbine</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Gorlov 7kW (Ben Elghali et al., 2007)</li> </ul>
	Dispositivos efecto venturi	Por medio de un dispositivo colector tipo embudo el flujo de agua pasa a través de este generando un diferencial de presión haciendo funcionar una turbina incorporada o en tierra.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotech Tidal Turbine</li> <li>Open-Centre Turbine</li> </ul>	 <p>© 2008 AQUARET (Khan, Bhuyan, Iqbal, &amp; Quaicoe, 2009)</p>
No turbina	Hidrodeslizador oscilante	Se mueve hacia arriba y abajo en un plano perpendicular al flujo de la corriente. Este movimiento crea presión sobre un fluido hidráulico, el cual impulsa un motor hidráulico, y por extensión, un generador eléctrico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>EEL Energy</li> <li>TURBOFOIL</li> <li>Hydrofoil Resonator</li> </ul> <p>Cascade</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Stringray 150-250KW (Ben Elghali et al., 2007)</li> </ul>



<p>Tornillo de Arquímedes</p>	<p>Consiste en un dispositivo en forma de tornillo helicoidal, el agua circula de manera perpendicular a su posición haciéndolo girar y éste a su vez acciona la turbina.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flumill Power Tower</li> </ul>	 <p>© 2011 AQUARET (EMEC, 2017)</p>
<p>Cometa marino</p>	<p>Anclado al fondo del mar, lleva una turbina debajo de la aleta. La cometa se sustenta en la corriente haciendo que el agua fluya a través de la turbina.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deep Green</li> <li>• SeaCurrent TidalKite</li> <li>• GEM</li> </ul>	 <p>Trayectoria del cometa Cometa marino Cuerda Cable submarino Fondo marino</p> <p>(Roberts et al., 2016)</p>

FUENTES:(SENER 2017b; Khan et al. 2009; Roberts et al. 2016; Condes 2014; CEMIE-Océano 2017; EMEC 2018)

Las turbinas a su vez pueden ser clasificadas como sigue:

- I. **Turbinas hidrocínéticas de eje horizontal o axiales:** El eje de rotación está diseñado para ser paralelo a la corriente de agua entrante (Figura 3). Las palas que se usan son de tipo arrastre o elevación, algunas están diseñadas especialmente para operar tanto en los flujos de mareas entrantes como salientes y en flujos turbulentos. Su diseño debe ser de tal manera que se manipule la orientación de sus palas para maximizar la potencia del flujo entrante. Estas turbinas funcionan mejor cuando el flujo está en una sola dirección y es poco turbulento o cuando su instalación es a grandes profundidades y ancladas al lecho marino (Khan et al., 2009; Molloy, Taylor, & P.Eng., 2013; Roberts et al., 2016).

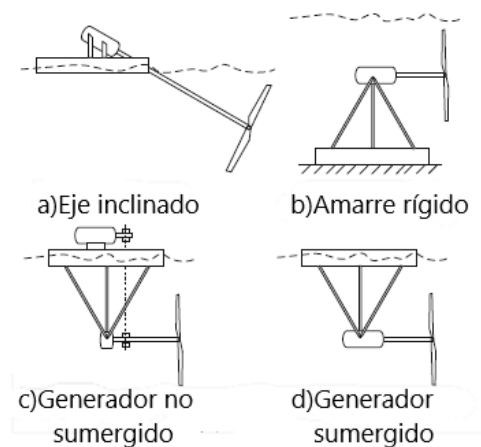


Figura 3. Turbinas hidrocínéticas de flujo axial (Khan et al., 2009).

- II. **Turbinas hidrocínéticas de eje vertical o de flujo cruzado:** Tienen un eje de rotación que es perpendicular al flujo de agua, es decir gira a  $90^\circ$  con respecto a la dirección del flujo de agua. Del mismo modo las palas son de elevación o de arrastre, por lo general consta de dos o tres palas, algunas están diseñadas para atrapar el agua mientras fluye a través de la turbina y usan esa energía para girar. Las turbinas de eje vertical tienen el mismo diseño que los de eje cruzado, algunos ejemplos son la turbina Darrieus (figura 4c), la turbina Gorlov (figura 4d) y la turbina Savonius (figura 4e). Estas turbinas frecuentemente necesitan ser iniciadas por una fuente alternativa de potencia o pala cuando la velocidad del flujo cae por debajo de un nivel mínimo, además algunas de ellas funcionan con una velocidad mínima de arranque para que se accione y pueda funcionar (Khan et al., 2009; Molloy et al., 2013; Roberts et al., 2016).

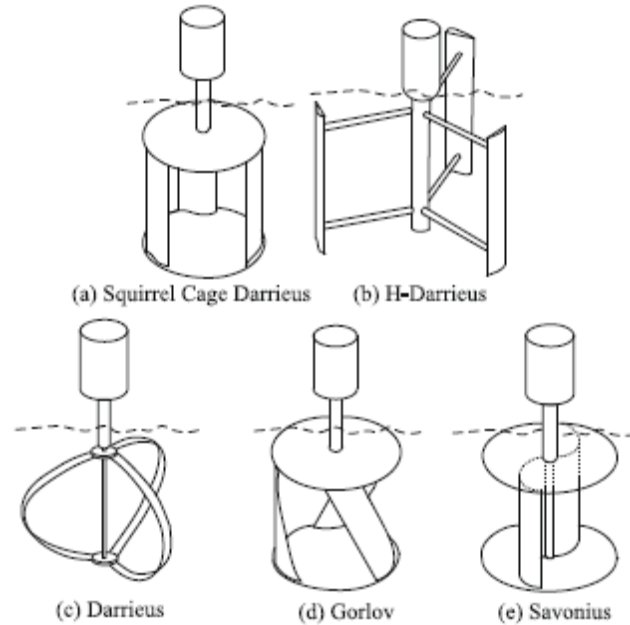


Figura 4. Turbinas hidrocineéticas de eje vertical o flujo cruzado (Khan et al., 2009).

Existen turbinas de eje cruzado con diseños compuestos que emplean conductos o difusores, que sirven para dirigir el flujo cuando la eficiencia de las palas se ve significativamente afectada por la dirección del flujo o si la turbina está ubicada en un sitio particularmente turbulento. Esto aumenta la tasa de eficiencia del flujo sobre el rotor, y permite controlar la potencia de salida a un valor determinado a partir de una turbina de menor diámetro con mayor eficiencia. En la actualidad, los conductos se ven más comúnmente en turbinas de eje vertical que en turbinas de eje horizontal (Figura 5) (Khan et al., 2009; Molloy et al., 2013).

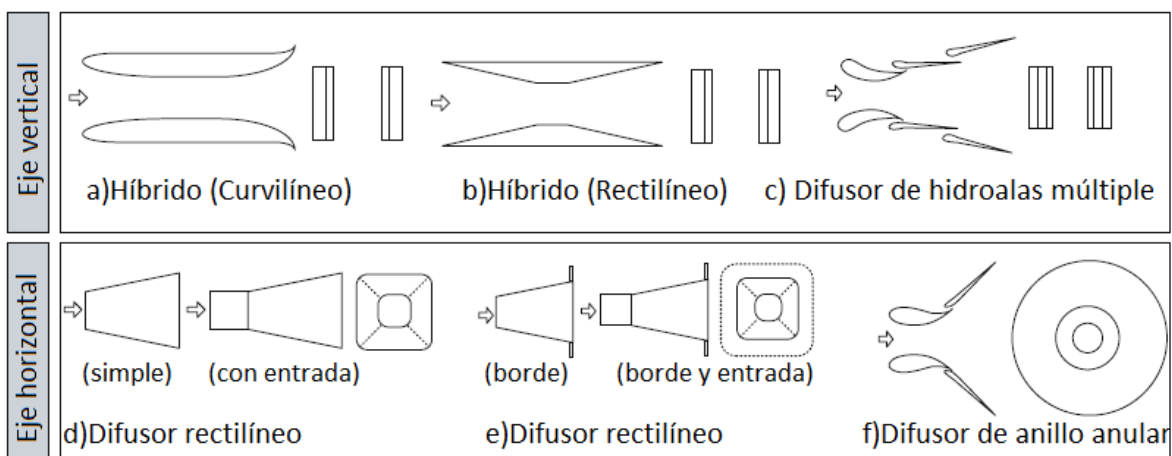


Figura 5. Tipos de conductos y difusores en una turbina de eje horizontal o vertical (Khan et al., 2009).

## 2.5 TURBINA GORLOV

La turbina Gorlov fue inventada entre 1993 y 1995 por Alexander Gorlov y fue desarrollada en la Northeastern University en Boston. Ha sido probada en laboratorios de la Northeastern University, la Universidad de Michigan y en la corriente del canal Cape Cod en Massachusetts. En estas pruebas la turbina de triple hélice mostró su confiabilidad y una eficiencia de hasta un 35%, lo que la hace una de las mejores máquinas hidráulicas en su campo (Gorban' et al., 2001; Zamora, 2012).

Este diseño se basa en la turbina eólica de eje vertical de Darrieus, que puede ser colocada tanto vertical como horizontal dentro de una corriente. Es capaz de conservar el sentido del giro sin importar la dirección de la corriente que la impulsa y es susceptible de ser instalada en ríos y corrientes marinas. Por la geometría de los álabes que la constituyen, se conserva el sentido de giro, teniendo como perfil aerodinámico de los álabes un área de sección transversal definida por una curva simétrica NACA, que se utiliza comúnmente en las alas de los aviones, aspas de rotores de helicópteros, álabes de turbinas eólicas de eje horizontal entre otros (Hinchey et al., 2014; E. Martínez, 2014; Zamora, 2012).

La turbina utiliza sus cuchillas para generar una fuerza de sustentación a partir del fluido que fluye a través de la turbina. La fuerza de sustentación resultante aplica un torque en el rotor girando a medida que la turbina gira. La suma del vector de las velocidades del fluido y de la pala del rotor determinan la sustentación y fuerza de arrastre generados por las palas de la turbina (E. Martínez, 2014).



Figura 6. Turbina Gorlov de eje horizontal (Gorban' et al., 2001; Zamora, 2012).

Debido al diseño versátil, tamaño, eficiencia y reducida velocidad de arranque, en este estudio se presenta el análisis de la turbina Gorlov como propuesta y alternativa para implementarse y aprovechar de la manera más práctica el potencial energético en una descarga submarina del acuífero (DASS) para obtener electricidad.

## 2.6 IMPACTO AMBIENTAL

El impacto generado por el aprovechamiento de las energías repercute en el ambiente, causando deterioro y pérdida de ecosistemas, y conflictos sociales y económicos cuando su aprovechamiento e implementación se enfoca en un solo sector social (principalmente el empresarial).

Los principales impactos ambientales causados por el aprovechamiento de las ER son:

**Geotérmica:** El principal es causado por la sobreexplotación de agua del reservorio geotérmico, también se produce contaminación del aire (se liberan gases no condensables y CO<sub>2</sub>), del agua (depósitos geotérmicos con alta disolución de compuestos químicos tóxicos), del suelo (grandes cantidades de terreno se destinan a la construcción de las plantas) y del subsuelo (microsisimos por reinyectar el fluido geotérmico de elevada presión sobre rocas fracturadas). Una solución parcial a estos impactos es reinyectar el agua al yacimiento geotérmico, sin contaminar el agua subterránea (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

**Eólica:** Dentro de los principales efectos negativos se encuentra el impacto visual, la interferencia electromagnética, contaminación acústica, cambio y uso de suelo, mortalidad de aves y más (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

**Bioenergía:** Las principales desventajas se centran en la necesidad de grandes áreas para los cultivos energéticos, propiciando la deforestación, mientras que para el monocultivo hay un exceso de uso de pesticidas y fumigaciones por las plagas. Se llegan a producir grandes cantidades de residuos que pueden llegar a ser contaminantes para el aire o el suelo. Respecto a la biomasa forestal, su aprovechamiento en centrales eléctricas representa altos costos por acopio y transporte de residuos forestales (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

**Centrales hidroeléctricas:** El impacto radica en la alteración de los ecosistemas naturales, en la pérdida o degradación de los suelos y la alteración significativa del paisaje. También genera la pérdida del ecosistema acuático y terrestre, así como el desplazamiento de especies (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

**Energía solar térmica y fotovoltaica:** Los efectos negativos por la generación de energía solar FV se enfocan en las grandes superficies de terrenos que se necesitan para la captación de la radiación solar y las grandes cantidades de residuos de silicios que deja la fabricación de las celdas solares de grosores extradelgados. Mientras que en la solar térmica se desperdicia agua por la evaporación de las torres de enfriamiento (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

**Energía por corrientes marinas:** Los impactos generados por las turbinas de eje axial o cruzado se enfocan principalmente en la posible contaminación del agua (materiales

inadecuados o defectuosos), la modificación del flujo (alrededor del dispositivo) y alteración del transporte de sedimentos, afectando y alterando el hábitat de organismos. También podrían causar contaminación acústica, golpes a organismos (con las palas del rotor u otras partes móviles) y cambios de comportamiento de organismos (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014).

**Energía por mareas:** Entre los impactos generados por presas o barreras están la alteración en el transporte de sedimentos y de las rutas de migración de la fauna acuática (Roberts et al., 2016).

## 2.7      **NORMATIVIDAD**

Debido al avance tecnológico, la caída de los costos y la creciente inclusión de las ER en diversos países, se ha exigido la evolución en las políticas públicas para estimular el despliegue e integración de las ER de forma efectiva. Así también, se han promovido incentivos fiscales con el objetivo de transparentar y divulgar los resultados alcanzados mediante programas de monitoreo y auditorías y se han generado metas específicas de la capacidad de generación a alcanzar en tiempos específicos.

Se estima que si las políticas ambientales se emplearan con mayor efectividad el uso de las ER se desplegaría más rápido. Por ejemplo, con la fijación del precio del carbono (impuestos al carbono o sistemas de comercio de emisiones) se reduciría su consumo y se fomentaría la búsqueda de alternativas. Por el contrario, los subsidios a los combustibles fósiles continúan limitando el crecimiento de las ER a nivel mundial.

En México en conformidad con los artículos 1, 4, 25, 27, 28, 115 y 124 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEDUM), donde se establecen los fundamentos constitucionales de las ER, se busca resguardar la integridad de los derechos humanos, promover, respetar, proteger y garantizar el derecho a un medioambiente sano, e implementar mecanismos de planeación y control para el sistema eléctrico nacional, mejores prácticas para el uso de la energía y la disminución de generación de gases de efecto invernadero.

Por medio de la Ley de Transición Energética (LTE) se establece como objetivo la especificación en tiempo y forma de los mecanismos de generación y consumo de energías limpias. La LTE establece que la SENER fijará como meta una participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25% para el año 2018, del 30% para 2021 y del 35% para 2024. Para dar cumplimiento al Acuerdo de París la Ley General de Cambio Climático (LGCC) se compromete a reducir el 22% de sus emisiones de gases de efecto invernadero y el 51% de carbono negro para 2030. Está ley incluye también aspectos para la protección al ambiente, el desarrollo sustentable, la preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Otras leyes relevantes a la implementación de proyectos de ER son la Ley de planeación, Ley orgánica de la administración pública, Ley de los órganos reguladores coordinados en materia energética, Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos, Ley de inversión extranjera, Ley de desarrollo rural sustentable, Ley de asociaciones público privadas y la Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Algunas de las anteriores se enfocan en determinar las acciones que debe tener la SENER para establecer, conducir y coordinar la política energética del país y que la SEMARNAT elabore, promueva y difunda las tecnologías y formas de uso requeridas para el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas, además de generar programas para fomentar el uso de tecnología para el ahorro de energía y agua (CEMDA, 2017; OES, 2017; REN21, 2017).

### CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO

En esta sección se describen de manera general la localización de las corrientes marinas de los mares mexicanos que por su intensidad podrían tener un potencial para ser utilizadas para obtener energía.

En nuestro país las corrientes marinas de mayor intensidad se encuentran principalmente en dos sitios: la Corriente de Yucatán en el mar Caribe al este de la península de Yucatán y las corrientes generadas por las mareas en el Golfo de California. La corriente de Yucatán adquiere una mayor intensidad conforme avanza hacia el Golfo de México donde se convierte en la Corriente de Lazo y posteriormente en la Corriente del Golfo o “Gulf Stream” una vez que sale del Golfo de México y viaja bordeando la costa oriental de Estados Unidos, llevando grandes masas de agua cálida desde el Golfo de México hasta las costas de Europa del Norte.

La corriente de Yucatán tiene unos 100 km de ancho con profundidad de 800 a 1200 metros y alcanza velocidades máximas de 2 a 3 m/s y transporta una potencia de unos 1400 TW en forma de calor. Un caso específico es el canal de Cozumel, donde las velocidades alcanzan los 1.5 m/s siendo regulares (Athie et al., 2011; López et al., 2011; Riba, 2013).

Sin embargo, así como podría ser aprovechable en términos de energía el flujo unidireccional de un río, existen en la Península de Yucatán descargas de agua que hasta el momento no han sido contempladas como posibles fuentes de energía.

El mar costero del estado de Yucatán está localizado al norte de la Península de Yucatán. Es parte del Golfo de México y tiene gran influencia del Mar Caribe, con el que está conectado. Tiene una amplia (hasta 245 km costa afuera) y somera plataforma continental, con una profundidad promedio de 50 m, pendiente de 1:1000 (Valle-Levinson et al., 2011; Vera, Mariño, et al., 2012). Aunque tiene un régimen micromareal, presenta una importante variedad de rangos de marea. Las mareas en el Golfo de México son el resultado de la oscilación de la marea en el Océano Atlántico, producto del forzamiento astronómico (SENER, 2017b). Los constituyentes principales de la marea dentro del Golfo de México son el lunisolar ( $K_1$ ), el lunar diurno ( $O_1$ ) y el semidiurno lunar principal ( $M_2$ ); sin embargo, el comportamiento de la marea varía a lo largo de la costa del Golfo (B. Martínez & Parés, 1998). En particular en la costa del estado de Yucatán la componente de marea  $M_2$  es mínima.

De acuerdo a los registros de las estaciones de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA) se sabe que el tipo de marea cercano a la península de Florida es semidiurno con un rango de marea mesomareal de 2 a 4 m y va cambiando mientras se aleja de esta, llegando a ser diurno con un rango de marea micromareal <2m en la península de Yucatán (Pinet, 2003).



### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio está ubicado en el municipio de Dzilam de Bravo ubicado al Norte de la Península de Yucatán (PY) entre los paralelos 21° 19' y 21° 32' latitud norte y los meridianos 88° 35' y 88° 58' longitud oeste (figura 7). Cuenta con un clima seco muy cálido con un rango de temperaturas de 24 a 32 °C y precipitaciones de 500 a 700 mm año<sup>-1</sup> que ocurren principalmente entre junio y octubre (temporada de lluvias), aunque también se presentan eventos de lluvias durante la temporada de nortes de noviembre a febrero mientras que la temporada de secas ocurre de marzo a junio (INEGI, 2009; Vera, Mariño, et al., 2012).

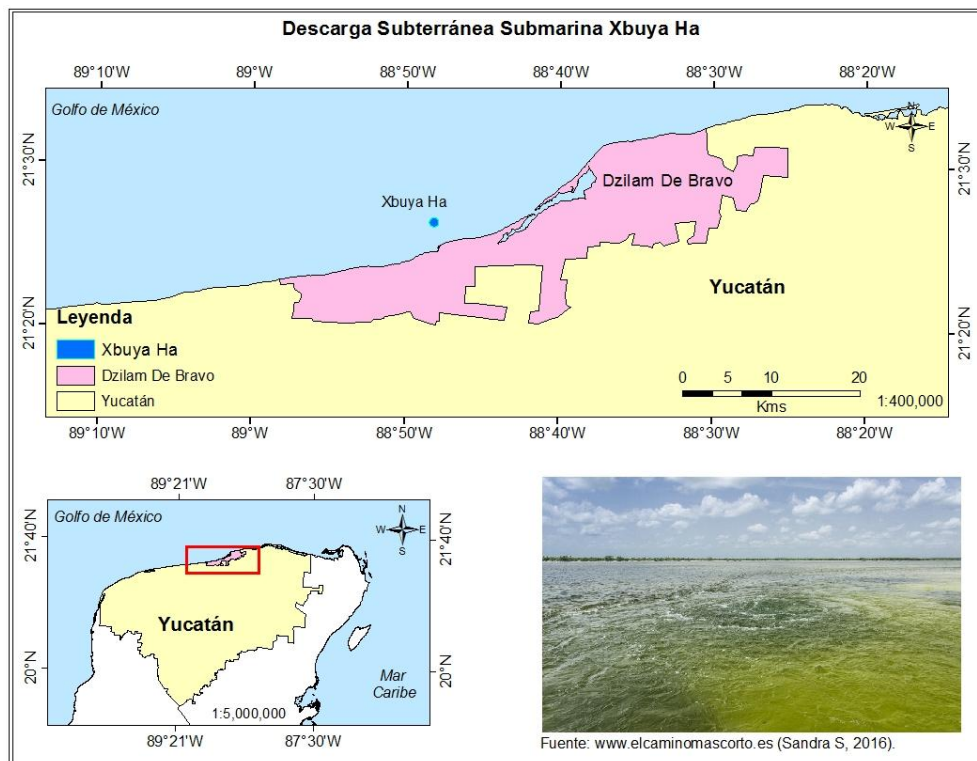


Figura 7. Ubicación de la zona de estudio.

Dzilam de Bravo, así como la PY en su totalidad, es de una geología kárstica conformado por rocas de carbonato de calcio altamente permeables, que al entrar en contacto con agua de origen meteórico, se disuelve permitiendo la infiltración del agua en grutas y cavernas (Figura 8). El agua de lluvia de las intensas precipitaciones tropicales de la región, se infiltra y se acumula en el subsuelo como un lente de agua dulce de aproximadamente 55 m de espesor (Marín et al. 2000 citado por Vera, Mariño, et al., 2012), que yace por encima de una masa de agua salada de origen marino (intrusión salina) conformando así el acuífero kárstico de Yucatán (Bauer-Gottwein et al., 2011; Beddows et al., 2007).

Debido a que el nivel del acuífero es más elevado que el nivel del mar, el gradiente de presión genera un flujo del agua que viaja a través de las fisuras que están conectadas directamente al mar y dan lugar a las descargas de agua subterránea submarina (SGD por sus siglas en inglés) o manantiales submarinos; este flujo depende de la precipitación por la rápida recarga del acuífero y del nivel del mar (Mateos, 2016).

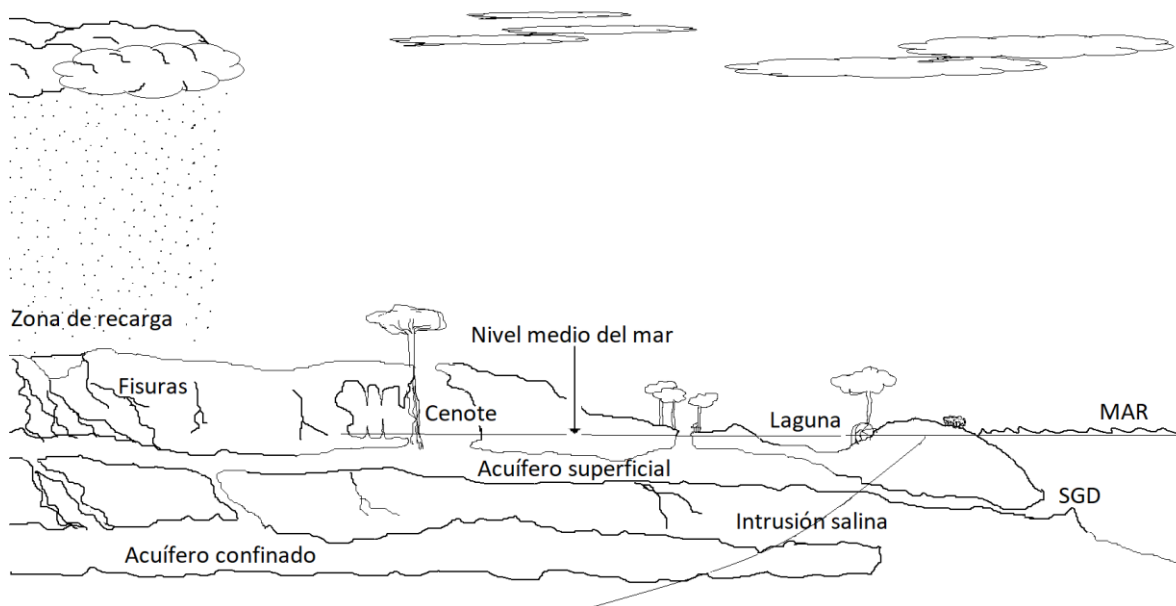


Figura 8. Esquema del acuífero kárstico de la Península de Yucatán

El flujo de agua subterránea tiene orientación de noroeste en gran parte de la península y en forma radial. Además, el flujo está altamente influenciado por la estructura denominada anillo de cenotes, en el anillo externo del cráter de Chicxulub (Figura 9), generado por el impacto de un meteoro durante el período Cretácico hace  $\approx 65$  millones de años (Bauer et al., 2011; Villasuso Pino et al., 2011). Por su mayor permeabilidad, hay un flujo preferencial del agua subterránea a través de este anillo y, por consiguiente, las zonas de mayor influencia de descargas continentales están localizadas en las regiones de Celestún-El Palmar y Dzilam de Bravo, siendo estas las intersecciones del anillo con el mar. Por consiguiente siendo Dzilam de Bravo la zona de estudio, se han identificado una alta agrupación de descargas de agua subterráneas en forma de manantiales submarinos (Valle-Levinson et al., 2011; Vera, Mariño, et al., 2012).

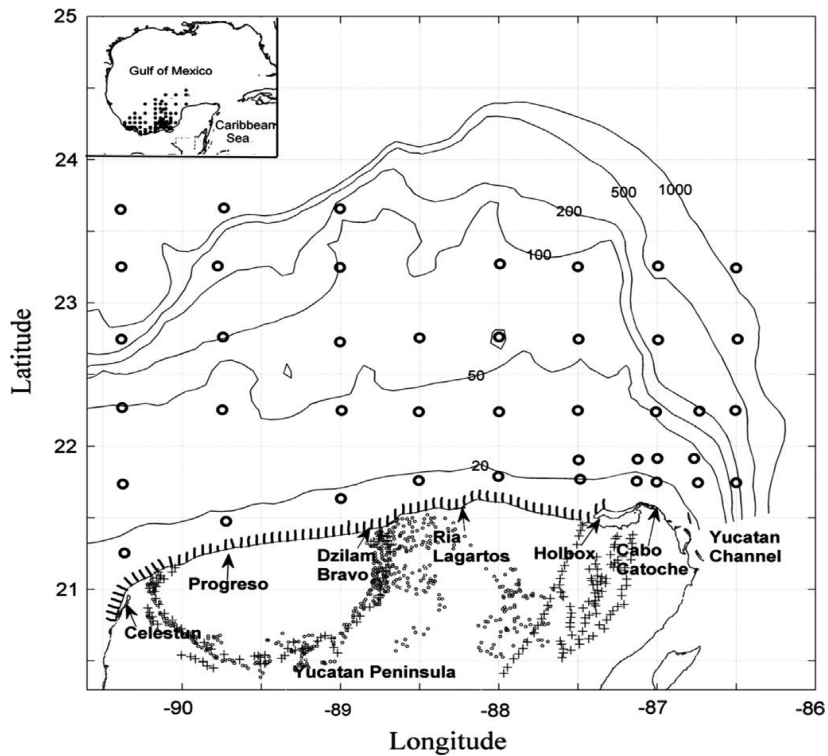


Figura 9. Esquema de delimitación del anillo de cenotes de Celestún-Dzilam de Bravo (Enríquez et al., 2013).

Estas descargas pueden ser puntuales a través de una apertura directa en el lecho marino o difusas a través de los sedimentos del lecho. Pueden ser descargas de agua dulce o bien descargas de una mezcla de agua dulce subterránea y de agua de mar recirculada en la zona costera. Han sido identificadas como recurso de nutrientes para muchos ecosistemas costeros (Kantún & Herrera-Silveira, 2015; Valle-Levinson et al., 2011).

Uno de los manantiales más importantes por su volumen de agua de descarga ( $\sim 1\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en el océano, es el manantial Xbuya-Ha, que significa “Laberinto de agua” en Maya (Valle-Levinson et al., 2011). Las velocidades de flujo del manantial presentan intervalos de 0.1 a 4 m/s con direcciones dominantes hacia el norte y el oeste. Al descargar en el mar costero, confluye a un ambiente marino sujeto a las corrientes de la zona que son predominantemente hacia el oeste, forzadas por los vientos Alisios, que tiene dominancia del NE (Kantún & Herrera-Silveira, 2015). Este manantial es un chorro ascendente, donde el flujo de salida es hacia arriba con un ángulo de  $40^\circ$  respecto a la vertical, donde las oscilaciones de las mareas son predominantemente diurnas en mareas vivas, con una amplitud entre 0.75m a 1m y 0.15m durante mareas muertas” (Valle-Levinson et al., 2011; Vera, Mariño, et al., 2012).

## 3.2 METODOLOGÍA

### 3.2.1 DATOS DE LA DASS

Para el desarrollo del estudio se utilizaron datos medidos en la boca de descarga del manantial Xbuya-Ha de las fechas comprendidas entre el 17 de mayo al 24 de octubre de 2008 y del 04 de marzo de 2009 al 25 de mayo de 2009. En el estudio: “Forzamientos meteorológicos y oceanográficos que gobiernan las descargas submarinas del acuífero en Yucatán” de (Vera Manrique, 2012), se usaron las mismas mediciones con el objetivo de encontrar la relación entre la velocidad del flujo con las mareas, las corrientes, la lluvia, entre otras variables. En este estudio, sin embargo, se utilizaron los datos medidos crudos (proporcionados por el Dr. Ismael Mariño Tapia de CINVESTAV-Mérida), y se procesaron y analizaron para describir la naturaleza del flujo y estimar el potencial energético del mismo.

Para medir las variaciones de la velocidad de salida del agua del manantial Xbuya-Ha ubicado a 250 m de la línea de costa, se instaló un Correntímetro Acústico Doppler marca Nortek Vector. Se realizaron mediciones de forma continua durante 5 minutos a una frecuencia de 2 Hz cada hora (lo que permite adquirir 600 mediciones por “burst”). Los datos se almacenaron en una memoria interna, También se registraron datos de las variaciones del nivel del mar, salinidad y de la temperatura del agua mediante un CTD (que tiene sensores de conductividad, temperatura y de presión). Ambos instrumentos se instalaron aproximadamente a 2 metros de profundidad, justo en la desembocadura de la descarga. La colocación de los instrumentos fue de tal manera que midieran el flujo de corriente del agua salobre, ver figura 10.

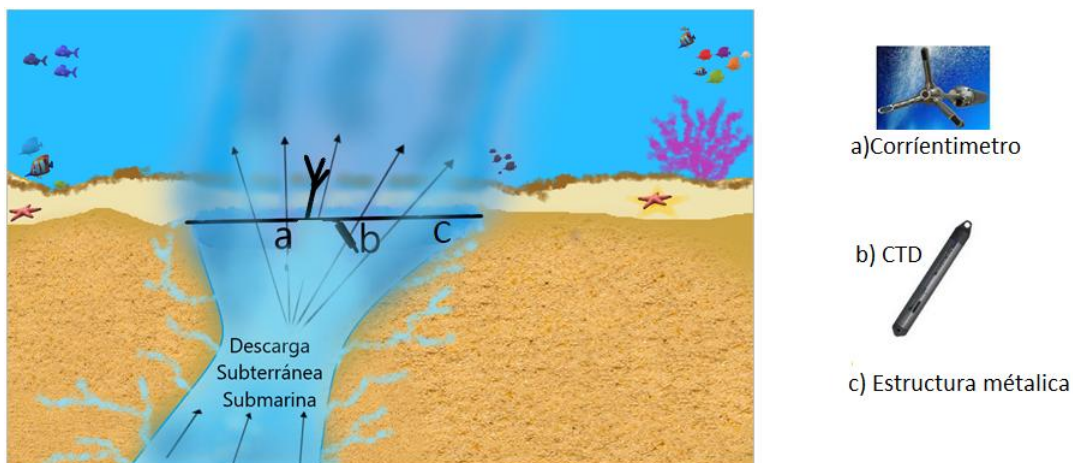


Figura 10. Esquema del anclaje para las mediciones del manantial Xbuya-Ha; adaptada de (Vera Manrique, 2012).

El corrientímetro Vector genera un campo tridimensional (por sus tres sensores con los componentes x-eje este, y-eje norte y z-componente vertical) y por medio del efecto Doppler puede medir la velocidad del flujo, transmitiendo un pulso sonoro (conocido como pings) a una frecuencia conocida y producida por los transductores del instrumento; dichos pings viajan a través del agua y se reflejan en partículas suspendidas (por ejemplo plancton, partículas del sedimento) en el agua y por lo tanto, se mueven con el flujo (con la misma velocidad y dirección que la corriente). Parte de ese sonido reflejado regresa al instrumento con una diferente frecuencia, y es detectado por un receptor; así con el tiempo de regreso y la diferencia de frecuencias de los ecos, se calcula la velocidad y dirección de las partículas que se mueven en el agua (y por ende, del flujo de agua).

### 3.2.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Los datos del instrumento son exportados para su tratamiento. Los datos en formato ASCII, estos se abrieron con un editor de texto para eliminar los textos y caracteres no numéricos y posteriormente los datos de fecha, hora y velocidades en sus componentes X, Y y Z se importaron al programa Matlab 2016.

De los datos de velocidades, se seleccionaron únicamente los ejes X y Z por lo que la velocidad total del flujo es igual a

$$|\vec{v}| = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad \text{Ecuación [1]}$$

donde  $V_x$  es la velocidad (respecto al eje X) de la componente horizontal del flujo en dirección norte-sur, y  $V_z$  es la velocidad (respecto al eje Z) de la componente vertical del flujo dirección arriba-abajo. Esto es por la posición en la que se colocó el corrientímetro, cuidando que quedara alineado meridionalmente, eliminando la componente  $V_y$  además de estar “mirando al cielo”. Los componentes del corrientímetro Vector están posicionados como en la figura 11.

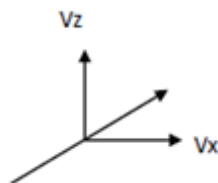


Figura 11. Posición de los componentes del corrientímetro Vector. Las componentes de velocidad se orientan como sigue:  $V_x$  (Norte-Sur),  $V_z$  (arriba-abajo): la caverna se orienta hacia el norte (en dirección costa fuera) por lo que el flujo de salida tiene sólo esas dos componentes.

A los datos de velocidad se les quitaron los datos espurios para generar bases de datos limpios de las variables de velocidad.

Los datos del CTD fueron también analizados y procesados en Matlab, limpiando datos erróneos.

Se obtuvieron series de tiempo de velocidad, temperatura, y nivel del agua en la descarga del manantial Xbuya-Ha. Se graficaron las tres variables en función del tiempo para observar su comportamiento diario, semanal, mensual y anual.

### 3.2.3 ANÁLISIS DE FOURIER

Las herramientas más usadas para caracterizar procesos oceánicos como las mareas, que tienden a ser periódicas y en múltiples frecuencias son el análisis de Fourier y el análisis espectral. A través de los coeficientes de Fourier se pueden obtener periodogramas, los cuales se usan para definir densidades espectrales de series de tiempo.

Con las series de tiempo de velocidad del flujo de la corriente de la DASS se realizó un análisis de densidad de poder espectral. El procesamiento de la información se realizó empleando el programa Matlab 2016 y la técnica de análisis espectral que se utilizó fue la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Existe un vínculo entre la FFT y la transformada de Fourier; esta última identifica o distingue las diferentes frecuencias senoidales (y sus respectivas amplitudes) que se combinan para formar una onda arbitraria. Matemáticamente, esta relación se establece como:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-2\pi ift} dt \quad \text{Ecuación [2]}$$

donde:  $\mathbf{s(t)}$  es la forma de onda para ser descompuesta por la suma de senoidales,  $\mathbf{S(f)}$  es la transformada de Fourier de  $\mathbf{s(t)}$ .

A la integración numérica de la ecuación [2] se le conoce como la transformada discreta de Fourier, que puede dar respuesta a problemas que no se solucionan con la transformada de Fourier, la cual implica la relación:

$$(f_k) = \sum_{i=0}^{N-1} s(t_i)e^{-2\pi i f_k t_i} (t_{i+1} - t_i) \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad \text{Ecuación [3]}$$

Haciendo una inspección de la ecuación [3] revela que si hay N grupos de datos de la función  $s(t)$  y si deseamos determinar las características (p.e. amplitud, frecuencia y fase) de N senoidales separadas, entonces el tiempo de cálculo es proporcional a  $N^2$ , el número de multiplicaciones, por lo que se necesita una computadora con alta velocidad para grandes series temporales largas y N grande. Sin embargo, en 1965, Cooley y Tukey publicaron su algoritmo matemático, que se conoce como la transformada de Fourier rápida (FFT), que es un algoritmo computacional que reduce el tiempo de computación de la ecuación [3] a un tiempo proporcional a  $N \log_2 N$ . Este aumento en la velocidad de la

computación ha revolucionado por completo muchas facetas del análisis científico (Oran, 1988).

Se han realizado trabajos donde se aplican las técnicas de análisis espectral mediante la FFT, como (Manzano, Corchete, & B. Lastra, 2007) que lleva por nombre “Análisis espectral del registro de marea en la estación de Ceuta”, el cual da una descripción de la formulación que se aplica para realizar un análisis espectral, que a continuación se desarrolla.

De la integral de Fourier se puede derivar un caso especial de series de Fourier, que puede ser representada por medio de una función periódica  $y(t)$  con período  $T$ , que está expresada como:

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad \text{Ecuación [4.1]}$$

Donde: la frecuencia fundamental  $f_0$  es la igual a  $1/T$ , y la frecuencia angular fundamental está dada por  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T$ .

La magnitud de los coeficientes están dados por las integrales

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \quad [4.2(a)]$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \quad n=0,1,2,3,\dots \quad [4.2(b)]$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \quad n=0,1,2,3,\dots \quad [4.2(c)]$$

Para la obtención de la integral de Fourier basta con sustituir las ecuaciones [4.2] en la ecuación [4.1], obteniéndose:

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(\lambda) d\lambda + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \left\{ \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(\lambda) \cos\left(\frac{2n\pi\lambda}{T}\right) d\lambda \right\} \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + \left\{ \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(\lambda) \sin\left(\frac{2n\pi\lambda}{T}\right) d\lambda \right\} \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right)$$

Ecuación [5.1]

Utilizando las identidades trigonométricas

$$\cos(A-B) = \cos A \cos B + \text{Sen} A \text{sen} B$$

Podemos escribir:

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(\lambda) d\lambda + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(\lambda) \cos \left[ \frac{2n\pi t}{T} (t - \lambda) \right] d\lambda \quad \text{Ecuación [5.2]}$$

La expresión [5.2] puede escribirse como función de la frecuencia angular  $\omega$ , si se considera que:

$$\begin{aligned} \omega_n &= 2n\pi/T \\ \omega_{n-1} &= 2(n-1)\pi/T \\ \Delta\omega &= \omega_n - \omega_{n-1} = 2\pi/T \end{aligned} \quad \text{Ecuación [5.3]}$$

Entonces escribimos la expresión [5.2] en la forma:

$$y(t) = \frac{\Delta\omega}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} y(\lambda) d\lambda + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} y(\lambda) \cos[\omega_n(t - \lambda)] d\lambda \quad \text{Ecuación [5.4]}$$

Ahora, si  $T \rightarrow \infty$ , la ecuación [5.4] toma el valor:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} y(\lambda) \cos\omega(t - \lambda) d\lambda \quad \text{Ecuación [5.5]}$$

ya que  $\Delta\omega$  será cambiado por  $d\omega$ , debido a que  $1/T \rightarrow 0$  y la integral "y" es finita. La ecuación [5.5] recibe el nombre de integral de Fourier, de la cual podemos obtener, la transformada de Fourier. Introduciendo las funciones  $a(\omega)$  y  $b(\omega)$ , partiendo de las ecuaciones [4.2], escritas en la forma en la cual fueron usadas para presentar la ecuación [5.1]; considerando además que  $T \rightarrow \infty$ , junto con las identidades (5.3) escribimos:

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\lambda) \cos(\omega\lambda) d\lambda \quad ; \quad b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\lambda) \text{sen}(\omega\lambda) d\lambda \quad \text{Ecuación [5.6]}$$

Que nos permite escribir la ecuación (5.5) en la forma:



$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] d\omega \quad \text{Ecuación [5.7]}$$

Como último paso para encontrar la transformada de Fourier definimos:

$$\sin \varphi(\omega) = \frac{-b(\omega)}{\sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}}; \cos \varphi(\omega) = \frac{a(\omega)}{\sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}} \quad \text{Ecuación [5.8]}$$

Sustituyendo en la expresión [5.7] tenemos:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} [\cos \varphi(\omega) \cos \omega t - \sin \varphi(\omega) \sin \omega t] d\omega \quad \text{Ecuación [5.9]}$$

Expresión que se puede simplificar considerando que:

$$\cos A \cos B - \sin A \sin B = \cos(A+B); \cos \theta = (e^{i\theta} + e^{-i\theta})/2$$

Escribiendo:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} (e^{i[\omega t + \varphi(\omega)]} + e^{-i[\omega t + \varphi(\omega)]}) d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} (e^{i[\omega t + \varphi(\omega)]}) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} (e^{-i[\omega t + \varphi(\omega)]}) d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} Y(\omega) e^{i\omega t} d\omega \end{aligned} \quad \text{Ecuación [5.10]}$$

En la que podemos identificar fácilmente la función compleja  $Y(\omega)$ :

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= |Y(\omega)| e^{i\varphi(\omega)} = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} e^{i\varphi(\omega)} = \\ &= \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} [\cos \varphi(\omega) + i \sin \varphi(\omega)] = a(\omega) - ib(\omega) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \end{aligned} \quad \text{Ecuación [5.11]}$$

Como consecuencia de las ecuaciones [5.10] y [5.11] podemos finalmente escribir la definición de la transformada directa e inversa de Fourier, junto las definiciones de espectro de amplitud y espectro de fase:

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \quad \text{Ecuación [5.12]}$$

Transformada de directa Fourier

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{Ecuación [5.13]}$$

Transformada de Fourier inversa

$$|Y(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} \quad \text{Ecuación [5.14]}$$

Espectro de Amplitud

A la expresión [4.1] se le conoce como serie de tiempo, que se puede expresar en términos de la frecuencia determinada por la expresión [5.12]. A esta función se le conoce como la transformada directa de Fourier que se puede representar por medio de un periodograma, siendo la gráfica de la frecuencia contra la varianza.

### 3.3.3 DENSIDAD DE PODER ESPECTRAL

Por medio de la transformada directa de Fourier  $Y(\omega)$  ( Ecuación [5.12]) es posible establecer una medida de la distribución del espectro por unidad de frecuencia, lo cual se denomina densidad espectral de potencial (PSD), ( Ecuación [6]).

$$|Y(\omega)|^2 \quad \text{Ecuación [6]}$$

Este espectro, está relacionado con el cuadrado de la amplitud de la señal, por lo cual es equivalente a la varianza (se define como el cuadrado de la desviación estándar). La gráfica del espectro contra la frecuencia representa la energía asociada a cada frecuencia donde se obtienen picos que representa la mayor varianza de la frecuencia centrada en el pico. Con este análisis se pueden desglosar las diferentes formas de oscilación que componen la señal de la marea en una localidad y que en general corresponden a los distintos componentes armónicos de la marea astronómica.

### 3.3.4 SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE ENERGÍA

En este estudio el objetivo principal es analizar el potencial energético de la DASS, para ello, el factor más importante es la velocidad del flujo de agua.

Primeramente (y después de la depuración y limpieza de los datos) se realizaron las gráficas de la velocidad en función del tiempo y se determinaron la velocidad máxima y mínima del flujo de agua.

Con el resultado de este análisis, se realizó una búsqueda intensiva de dispositivos existentes utilizados para obtener energía por corrientes marinas, en la página <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-developers/> del Centro de Europeo de Energía Marina (EMEC). De los dispositivos existentes se seleccionaron los que cumplieran

con las características del sitio de la DASS por su tamaño y capacidades y que ya han sido implementados en el campo laboral y se eligió un dispositivo para la evaluación y análisis del potencial energético.

### 3.3.5 CÁLCULO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

Para realizar el cálculo del potencial energético del manantial Xbuya-Ha se utilizó como base la velocidad del flujo de corriente del manantial y las características de la turbina.

Siendo que la potencia está definida por la ecuación 1.

$$Potencia = PQ \quad \text{Ecuación [7]}$$

Donde  $P$  = Presión y  $Q$ = Flujo Volumétrico

Ahora con la presión como:

$$P = \rho \frac{U^2}{2} \quad \text{Ecuación [8]}$$

Y el flujo volumétrico:

$$Q=UA \quad \text{Ecuación [9]}$$

Sustituyendo [2] y [3] en [1] tenemos que la potencia disponible en una corriente de fluido es:

$$Potencia = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad \text{Ecuación [10]}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $U$  es la velocidad de la corriente del fluido y  $A$  el área de la sección transversal de la corriente.

Por lo tanto, la potencia máxima  $P_{E_{max}}$ , extraíble al fluido viene dada por:

$$P_{E(max)} = \frac{1}{2} C_p \rho AV^3 \quad \text{Ecuación [11]}$$

El término  $C_p$  (coeficiente de potencia) es conocido como el límite de Betz y tiene un valor máximo teórico de 0.59. Este factor expresa el porcentaje de potencia utilizable, varía con el tipo de turbina y cada una tiene un máximo a la velocidad particular para la que se ha optimizado la turbina. (Hinchey et al., 2014; E. Martínez 2014; Pacheco et al., 2014).

Se realizaron los cálculos para el potencial máximo extraíble en tres casos específicos con respecto a las variaciones estacionales (lluvias, secas, paso de un huracán) y el total de este. También se tomó un ciclo de marea para un período de mareas vivas/muertas para analizar su comportamiento.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Los resultados se presentan en tres partes principales (1) análisis de la velocidad de corriente del flujo, (2) análisis espectral y (3) evaluación de los recursos energéticos.

### **Análisis de la velocidad de corriente del flujo**

Siendo que el manantial Xbuya-Ha es un chorro ascendente, donde el flujo de salida es hacia arriba y se encuentra alineado en dirección costa fuera, el corrientímetro Vector se colocó para que midiera las componentes de velocidad  $V_x$ (arriba-abajo) y  $V_z$ (Norte-Sur) del flujo, por lo que los resultados del nivel del mar y de las componentes  $V_x$  y  $V_z$  se muestran en las figuras 12 y 13.

**Primer período:** Comprende la época de lluvias del 17 mayo al 20 agosto del año 2008. Desafortunadamente la serie de tiempo es discontinua ya que el sitio de estudio es sujeto de diversas fuentes de afectación, desde las ocasionadas por el flujo hasta las generadas por la intervención humana (accidental o intencionalmente). Es claro que los primeros meses tuvieron descargas de gran intensidad, donde las velocidades de corriente  $V_x$ ,  $V_z$  presentaron máximos de 3.16 m/s y 1.33 m/s (figura 12 b y c) y mínimos de -0.87 m/s y -0.24 m/s (figura 12 b y c) respectivamente. El máximo y mínimo del nivel del mar fue de 2.05 m y 0.96 respectivamente (figura 12a).

**Segundo período:** Está asignado del 13 de septiembre al 24 de octubre del 2008, donde siendo período de lluvias no existió tal incremento en las velocidades  $V_x$ ,  $V_z$ , a consecuencia de la presencia del huracán Ike el 11 de septiembre del mismo año, generando un incremento en el nivel del mar. El nivel del mar máximo y mínimo fue de 2.05m-0.96m, 2.34m-1.22m (figura 12a) en el primer y segundo período de observación respectivamente; aumentando 0.26 m en el nivel del mar mínimo y 0.29 m en el nivel del mar máximo, que generó una disminución en la velocidad del flujo reflejado en un registro de velocidad  $V_x$  con un máximo de 0.72 m/s y un mínimo de -0.66 m/s, y  $V_z$  un valor 0.51 m/s como máximo y un valor de -0.04 m/s como mínimo (figura 12 b y c).

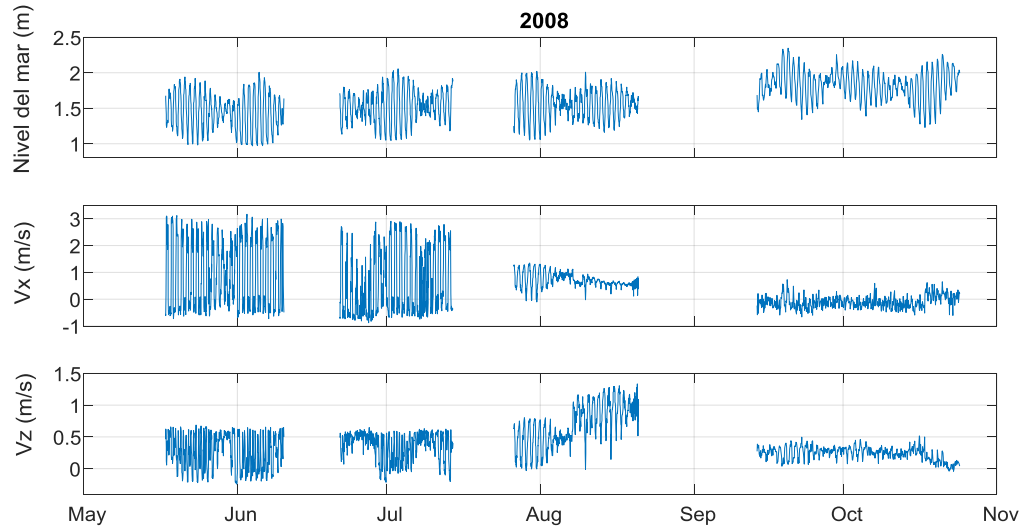


Figura 12. a) Nivel del mar; b) y c) Componentes Vx (norte-sur) y Vz (arriba-abajo) de la velocidad de salida del manantial Xbuya-Ha en época de lluvias y después del paso del huracán Ike.

**Tercer periodo:** Comprendido entre el 4 de marzo al 25 de mayo del año 2009. Incluye la temporada de secas por lo que el nivel de mar se mantuvo entre 2.16m, 0.95m como máximo y mínimo respectivamente (figura 13 a), mientras el flujo de las velocidades Vx y Vz se tuvieron 1.36m/s, -0.16m/s y 1.21m/s,-0.09m/s como máximo y mínimo respectivamente ( figura 13 b y c).

Un dato importante y a la vez alarmante, es el registro de eventos de flujos negativos para las velocidades Vx y Vz en ambos años. Esto indica la penetración de agua marina a través del manantial, fenómeno que ha sido reportado en estudios previos (Valle-Levinson et al., 2011; Vera, Mariño, et al., 2012).

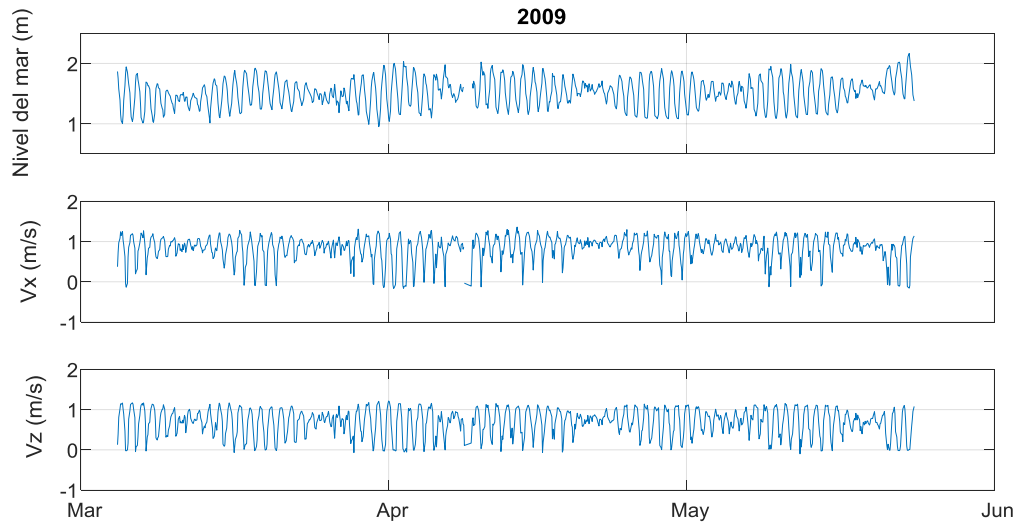


Figura 13. Variaciones del nivel del mar en el manantial Xbuya-Ha; b) y c) componentes  $V_x$  (norte-sur) y  $V_z$  (arriba-abajo) de la velocidad de salida del manantial Xbuya-Ha durante la época de sequías.

La velocidad total ( $v_{total}$ ) del flujo del manantial submarino Xbuya-Ha, que refleja claramente la gran variabilidad temporal del flujo en las distintas temporadas y, ante eventos climáticos extremos se presenta en la figura 14. Se puede apreciar que las velocidades máximas se registran en temporada de lluvias, y en ese año particularmente alcanzando valores de 3.17m/s; durante la temporada de secas el flujo disminuye considerablemente, manteniendo valores de velocidad que siguen siendo sustanciales (alcanzando 1.5 m/s); y durante el paso del huracán Ike, el flujo se ve sustancialmente bloqueado, alcanzando valores de 0.5 m/s, mientras que el año siguiente de mediciones (2009) tuvo durante los meses de registros (febrero a junio) velocidades de flujo más uniformes que varían modulados claramente por las mareas (figura 14).

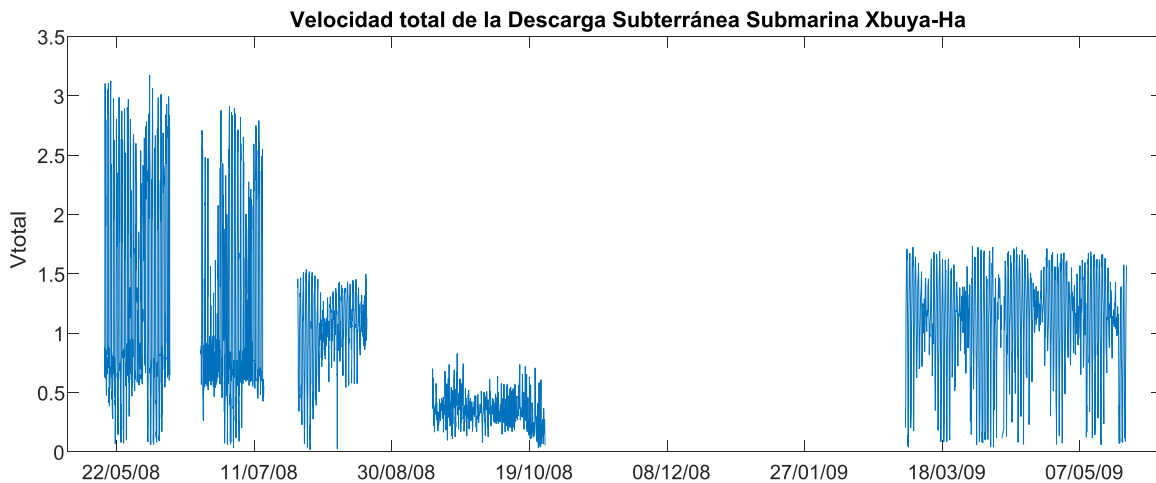


Figura 14. Velocidad total del flujo del manantial Xbuya-Ha.

En resumen, durante la temporada de lluvias hay un aumento en la  $v_{total}$  cuando adicionalmente el nivel del mar en el Golfo de México es menor. Esto genera una menor presión del mar hacia la boca del manantial y con la lluvia la presión hidrostática del acuífero es mayor, favoreciendo la salida del flujo. En caso contrario, cuando el nivel del mar es mayor se ejerce mayor fuerza de resistencia al flujo de descarga, generando un “tapón” sobre la boca del manantial; esto ocurre en mayor magnitud con eventos meteorológicos extremos (tras el paso del huracán Ike) o durante la temporada de Nortes.

En la figura 15 se muestra cómo el nivel del mar determina clara e inversamente la velocidad del flujo y confirma las diferencias encontradas en las diferentes temporadas climáticas. En esa misma figura se observa que el aumento en el nivel del mar disminuye las velocidades del flujo, y se promueven los eventos de inversión del flujo, que coinciden con los momentos de máxima marea durante mareas vivas (panel central e inferior de la figura 15).

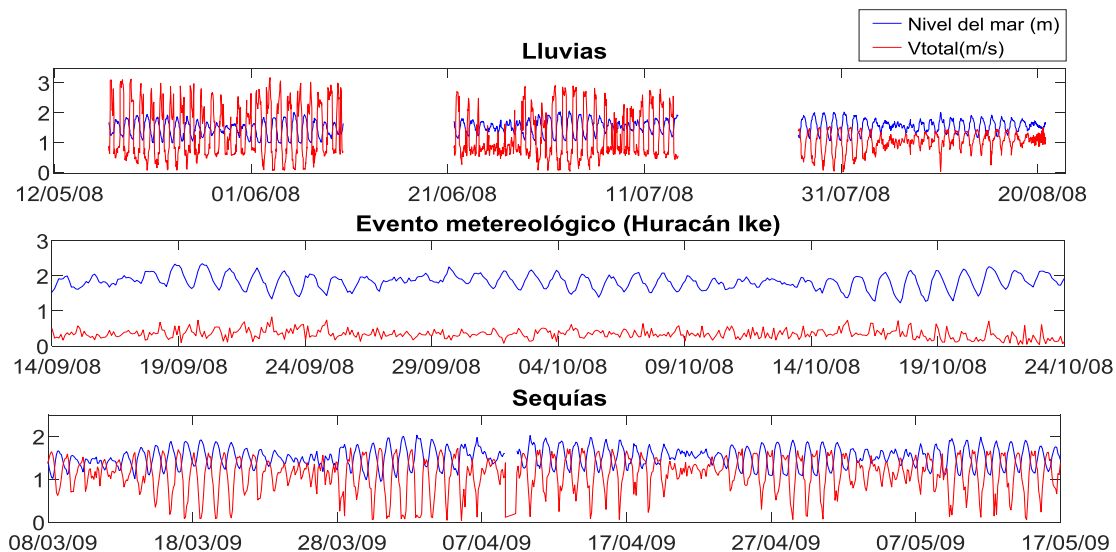


Figura 15. Relación entre el nivel del mar y la velocidad total de la descarga en el manantial Xbuya-Ha en a) época de lluvias, b) después del paso del huracán Ike y c) en época de sequías.

## Análisis Espectral

El análisis espectral de la serie de tiempo de la velocidad del flujo indica picos claros en las frecuencias diurnas  $K_1$  (solar diurna) con una frecuencia de 0.93 ciclos por día (cpd) y en las frecuencias lunar diurna  $O_1$  (1.007 cpd) (figura 15). La frecuencia semidiurna (2 cpd) es muy pequeña y se asocia a la componente  $M_2$  (1.96). El armónico de estas frecuencias es de 2.8 cpd con una menor densidad de energía (figura 16). Las oscilaciones de las mareas vivas predominan las mareas diurnas, mientras para mareas muertas influyen las mareas semidiurnas.

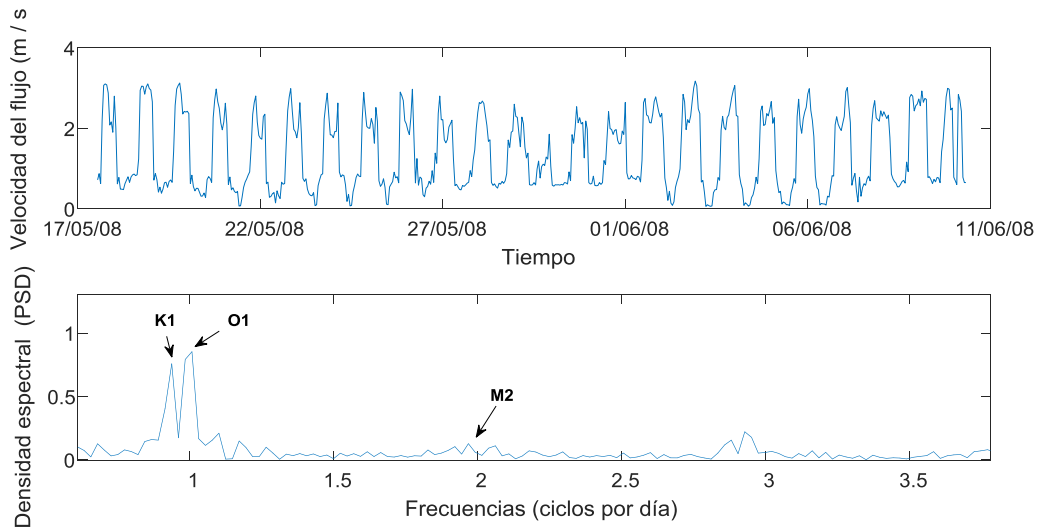


Figura 16. a) Serie de tiempo de la velocidad del flujo del manantial y b) densidad de poder espectral de la serie de tiempo.

## Evaluación de los recursos energéticos

A partir de la investigación de los dispositivos existentes y sus características técnicas, para este estudio se seleccionó la microturbina Gorlov ya que su  $v_{\min}$  de arranque es de 0.5m/s, lo que es adecuado para el sitio considerando que más del 75% de los datos de la velocidad total del flujo del manantial están arriba de este valor (figura 17). En este trabajo se van a considerar las velocidades de flujo mayor e iguales a 0.5 m/s.



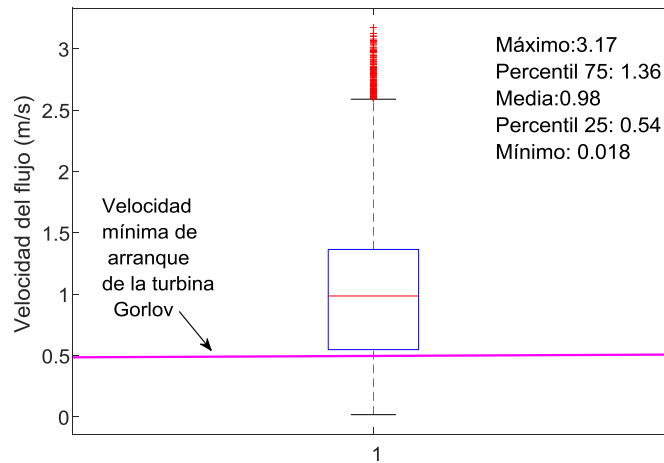


Figura 17. Velocidad total del flujo del manantial Xbuya Ha.

El cálculo del potencial energético se realizó utilizando la ecuación [11] con valores para un área de  $1 \text{ m}^2$ , con  $\rho$  igual a la densidad de agua salobre ( $1025 \text{ kg/m}^3$ ) ya que la conductividad medida tuvo un valor de  $40 \text{ mS/cm}$  (Vera Manrique, 2012), y un coeficiente potencial ( $C_p$ ) de 0.35, para las diferentes condiciones: lluvias, después de evento meteorológico (huracán Ike) y secas.

Para la temporada de lluvias se obtuvo un mayor potencial con un valor de  $PE(\text{max})=1.29 \text{ MW/m}^2$  (figura 18), seguido por secas con  $PE(\text{max})= 0.325 \text{ MW/m}^2$  (figura 19), y por último el huracán Ike con  $PE(\text{max})= 2.26 \text{ kW/m}^2$  (figura 20). El total del potencial extraíble fue  $PE(\text{max})=1.53 \text{ MW/m}^2$ .

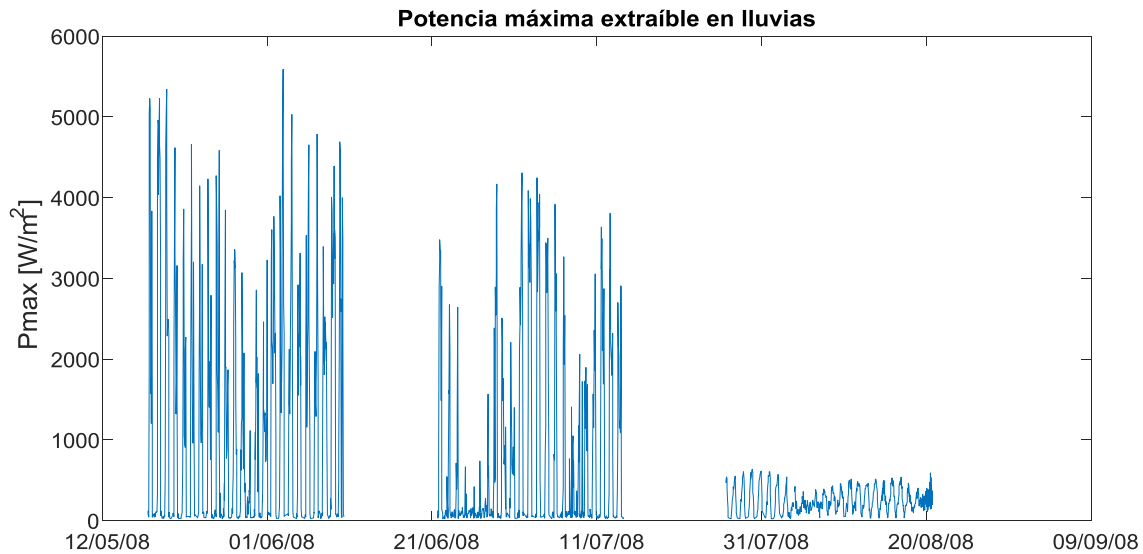


Figura 18. Potencial máximo extraíble evaluado para la descarga de agua del manantial Xbuya-Ha en época de lluvias del año 2008.

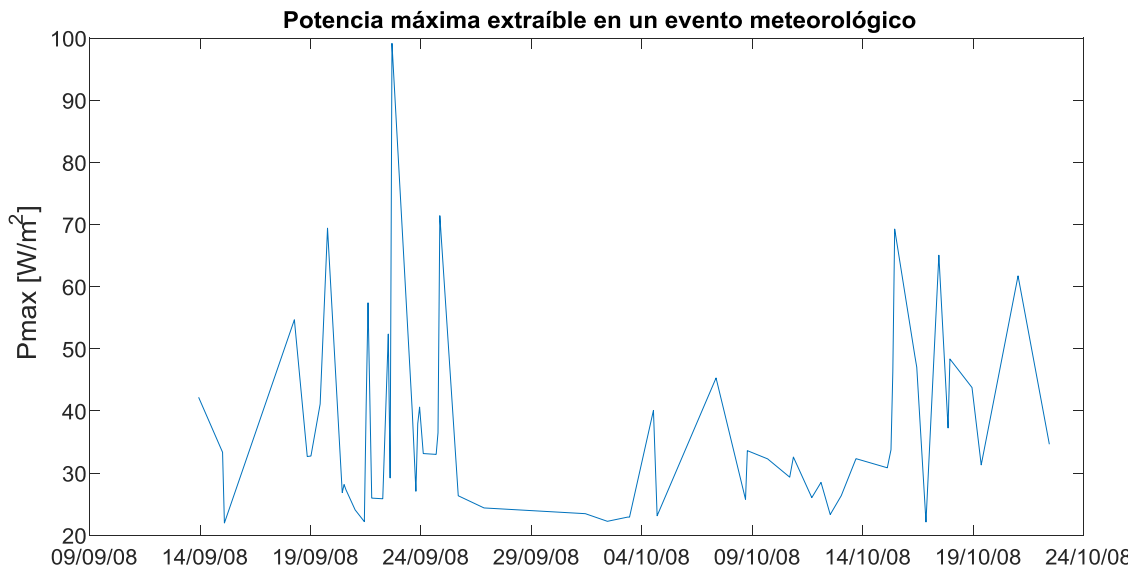


Figura 19. Potencial máximo extraíble evaluado para la descarga de agua del manantial Xbuya-Ha en un evento meteorológico (huracán Ike) ocurrido el 11 de septiembre del 2008.

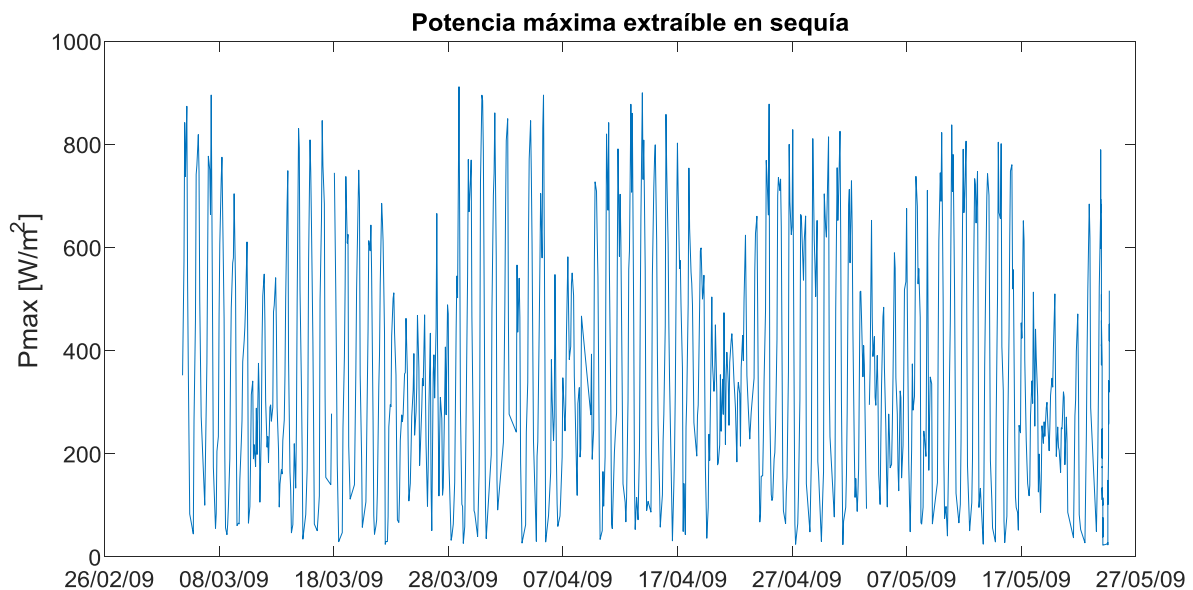


Figura 20. Potencial máximo extraíble evaluado para la descarga de agua del manantial Xbuya-Ha en época de secas del año 2009.

Las velocidades máximas, de 3.17m/s, se registraron el día 02 de junio de 2008 a las 22:00 horas ofreciendo una potencia máxima es de 5.56 kW. Si ese flujo fuera constante, en un día la energía total sería de 133.4 kWh. Sin embargo, el mismo día a las 9:00 horas se obtuvo un mínimo de 0.53 m/s su potencial máximo es de 26 W. De igual forma, si el flujo fuera constante, se generaría 624 Wh/día.

Para mostrar la aplicabilidad de los datos anteriores tenemos el siguiente ejemplo: si una casa con cuatro personas consume al mes un total de 48 kWh de energía, al día consumen 1.6 kWh aproximadamente de energía por lo que con 133.4 kWh se alimentarían 83 casas al día, mientras que con 624 Wh se suministrarían de energía 3 casas en un día, por lo cual ambas velocidades aportarían una gran capacidad para generar energía eléctrica en un día.

Ahora bien, identificando que la velocidad de arranque de la microturbina Gorlov es de 0.5 m/s, la velocidad mínima sería suficiente para que entrara en funcionamiento, mientras que la velocidad máxima permitiría tener la capacidad suficiente como para almacenar energía eléctrica, reducir los costos de consumo en algunos servicios, como mecanismo de emergencia o simplemente para suministrarla directamente a la población.

Al analizar con detalle las variaciones de marea tanto en mareas vivas como en muertas y su transición, se observa que al momento de decrecer el nivel del mar y llegar a su valor mínimo (marea baja) la velocidad crece hasta alcanzar su valor máximo. En el caso contrario cuando el nivel del mar alcanza su máximo (marea alta) la velocidad presenta su valor mínimo (figura 21 a). Estas consideraciones de las variaciones temporales a distintas escalas deben estudiarse a detalle en cada sitio con el potencial de ser aprovechado como recurso energético. En este caso, además de las variaciones diurnas con las mareas, es importante identificar las variaciones entre mareas vivas y muertas; y que en ciclos de mareas vivas se presentan tanto las velocidades más altas como las mínimas, mientras en mareas muertas las velocidades son menores pero más estables. Y finalmente, se debe considerar que aunque las mareas son el principal modulador, los eventos meteorológicos, oceanográficos y continentales pueden también influenciar fuertemente la descarga.

Para un ciclo de mareas vivas-muertas (en un período de 14 días) de los datos medidos, se registró una velocidad máxima de 1.69 m/s, y una velocidad mínima de 0.08 m/s durante mareas vivas, comprendido entre el 15 al 21 de marzo de 2009; para mareas muertas durante el 22 al 28 de marzo de 2009 se alcanzó una velocidad máxima de 1.57 m/s y 0.88 m/s como mínima (figura 21a). Para calcular el potencial energético extraíble en mareas vivas sólo se consideraron las velocidades mayores e iguales a 0.5 m/s, obteniendo un  $P_{E(max)}$  de 30.9 KW/m<sup>2</sup>. En el ciclo de mareas muertas el  $P_{E(max)}$  fue de 18.31 kW/ m<sup>2</sup> (figura 21b). Por lo tanto, los máximos valores de potencial se presentan durante las mareas vivas, pero en estos períodos también se encuentran los valores menores cayendo por debajo del mínimo requerido para que la turbina produzca energía.

Durante mareas muertas, aunque el potencial no llega a ser tan alto como el que se alcanza en mareas vivas, las velocidades de descarga durante todo el ciclo de marea son apropiadas para que la turbina funcione, logrando una producción continua de energía (figura 21b).

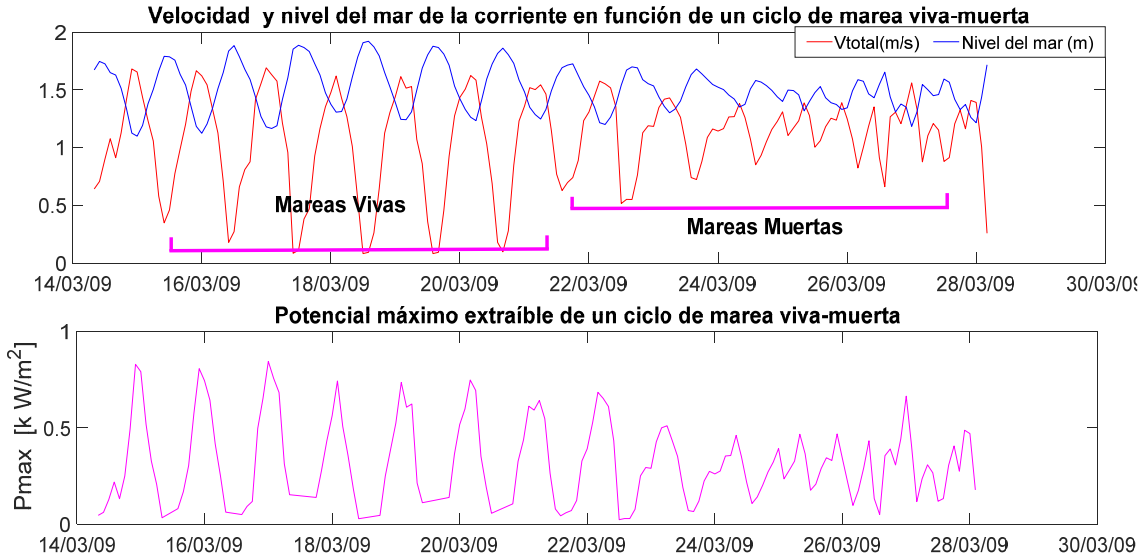


Figura 21. a) Extracción de un ciclo de marea viva/muerta de las variables de profundidad y velocidad total del manantial Xbuya Ha. b) Potencial máximo extraíble de un ciclo de marea viva/muerta del manantial Xbuya-Ha.

Considerando que los datos que se adquirieron fueron sobre la boca del manantial la microturbina Gorlov se colocaría en forma horizontal anclada por dos barras de metal al lecho marino en la boca del manantial para que, mediante la energía cinética que genera el flujo del agua, se accione la microturbina con el movimiento de rotación. La microturbina estaría acoplada a un generador eléctrico que produce la energía eléctrica (figura 22).

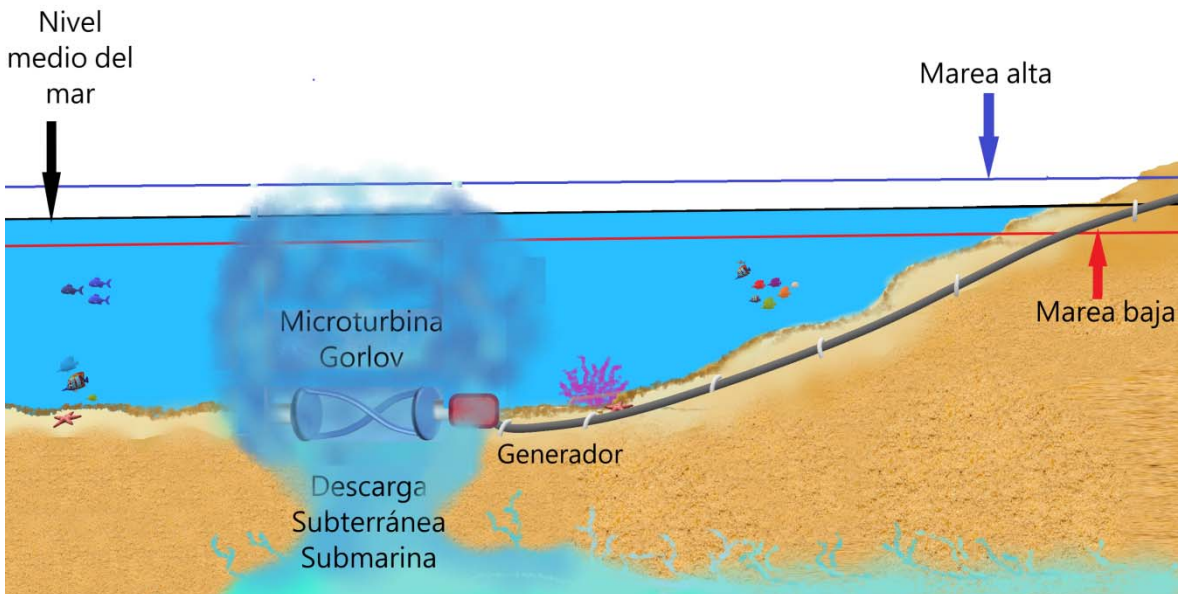


Figura 22. Instalación de la microturbina Gorlov en el manantial Xbuya-Ha.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

La tecnología para obtener energía eléctrica a partir de corrientes marinas ha mejorado con el paso del tiempo y ha crecido la variedad de dispositivos que existen. La mayoría de estos son instalados en aguas profundas. Sin embargo, existen zonas donde hay poca profundidad, como es el caso de esta investigación donde una microturbina Gorlov podría ser instalada sobre una descarga de agua submarina puntual cuya descarga fue monitoreada *in situ*. En el manantial Xbuya-Ha, objeto del presente estudio, la DASS presentó una velocidad máxima de 3.17 m/s, y los resultados del análisis de su potencial, tomando en consideración las diferentes variaciones temporales, a distintas escalas de tiempo, sugieren que el manantial podría generar varios megavatios en una pequeña minicentral eléctrica. Sitios como este podrían proporcionar energía limpia a pequeñas comunidades, hogares cercanos a la línea costera o para alimentar dispositivos que servirían para monitorear localmente las condiciones ambientales.

El parámetro más importante para el potencial energético es la velocidad de la corriente del flujo, seguido por la variación quincenal entre mareas vivas y muertas (en un período promedio de 14 días) para obtener un mayor  $P_E$ . La época del año de mayor  $P_{E(max)}$  es durante tiempo de lluvias ya que por la recarga del acuífero hay una mayor descarga que causa un incremento en la velocidad del flujo de la DASS.

En la zona de estudio se obtuvieron valores máximos de velocidad del flujo de 3.17m/s en la temporada de lluvias, con un potencial energético máximo de  $P_{E(max)}=1.29 \text{ MW/m}^2$ ; en la temporada de secas el flujo disminuye considerablemente, manteniendo valores de velocidad que siguen siendo sustanciales con una velocidad máxima de 1.5 m/s y un  $P_{E(max)}=0.325 \text{ MW/m}^2$ ; tras el paso del huracán Ike, el flujo se ve sustancialmente bloqueado, alcanzando un valor de 0.5 m/s en la velocidad máxima con un  $P_{E(max)}= 2.26 \text{ kW/m}^2$ .

Las velocidades de las corrientes del manantial mostraron estar forzadas principalmente por la marea. Se encontró principalmente los armónicos  $K_1$  y  $O_1$  como los más energéticos de los picos espectrales de corrientes del flujo observados. Otro componente mareal de importancia fue el armónico  $M_2$ .

Considerando que en algunas épocas el valor de la velocidad del flujo es menor (época de secas), se puede sustraer la microturbina para darle mantenimiento, ya que por la salinidad o vegetación podría ser afectado su funcionamiento.

Si bien los resultados indican que la instalación es factible, se necesita una legislación adecuada, pues no hay legislación mexicana para la implementación de nuevas alternativas energéticas para el aprovechamiento de la energía por corrientes marinas.

La metodología que se implementó puede ser utilizada para cualquier otro tipo de desembocaduras de agua continental, como un canal de río o la boca de un estuario. Sin embargo, estudios como el presente muestran la gran variabilidad que imponen las mareas a los flujos, por lo que en cualquier sitio es imperativo obtener mediciones detalladas y modelos numéricos que capturen la variación horaria de las mareas, las del orden de días que capturen mareas vivas o muertas y las del orden de meses que capturen las estacionales. Además, es muy esperable que haya variaciones entre años, sobre todo durante eventos anómalos de escala planetaria como durante años Niño o Niña.

## REFERENCIAS

- Athie, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badan, A., & Ochoa, J. (2011). Yucatan Current variability through the Cozumel and Yucatan channels. *Ciencias Marinas*, 37(4A), 471–492. <https://doi.org/10.7773/cm.v37i4A.1794>
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., & Torres-Talamante, O. (2007). Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 14(83), 32–35.
- Ben Elghali, S. E., Benbouzid, M. E. H., & Charpentier, J. F. (2007). Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status. *Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2007*, 2, 1407–1412. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2007.383635>
- CEMDA. (2017). Marco jurídico de las energías renovables en México, 65. Retrieved from [http://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2016/06/Marco-jurídico-de-las-energías-renovables-en-México.final\\_.pdf](http://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2016/06/Marco-jurídico-de-las-energías-renovables-en-México.final_.pdf)
- CEMIE-Océano. Una Visión Internacional para la energía oceánica 2017 (2017). Retrieved from [http://cemieoceanio.mx/downloads/OES\\_vision\\_ESP\\_V5.pdf](http://cemieoceanio.mx/downloads/OES_vision_ESP_V5.pdf)
- Condes, L. (2014). Energía oceanica. *BENTOS*.
- Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE782>
- EMEC. (2018). MARINE ENERGY. Retrieved from <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>
- Enríquez, C., Chiappa, X., Roldán, M., & Marín-Coria, E. (2017). Perspectivas sobre el aprovechamiento energético de los gradientes salinos en las costas mexicanas. In *Memorias del Congreso AMIP*. Veracruz, México.
- Guarduño Ruiz, E. P., García Huante, A., Rodríguez Cueto, Y., Graniel Bárcenas, J. F., Alatorre Mendieta, M., Cerezo Acevedo, E., ... Silva, R. (2017). *Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC). Estado del Arte*. Cemie-Océano ,Universidad Autónoma de Campeche. Retrieved from [https://cemieoceanio.mx/downloads/libros/CEMIEOceano\\_Gradiente\\_Termico.pdf](https://cemieoceanio.mx/downloads/libros/CEMIEOceano_Gradiente_Termico.pdf)
- Gorban', A. N., Gorlov, A. M., & Silantyev, V. M. (2001). Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. *Journal of Energy Resources Technology*, 123(4), 311. <https://doi.org/10.1115/1.1414137>
- Hinchey, M., Keough, R., Mullaley, V., Sinclair, H., Walsh, G., & Niblick, A. L. (2014). Design, Fabrication and Testing of a Water Current Energy Device. *Test*, 1–75. Retrieved from <https://www.google.com/patents/US5642984>
- INEGI. (2009). Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Tulancingo de Bravo. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
- IRENA. (2017). *Renewable Energy Capacity Statistics 2017*. Irena (Vol. 75). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.059>

- Issitt, M. L. (2013). Tidal forces. *Salem Press Encyclopedia of Science*. Salem Press. Retrieved from <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=88806564&lang=es&site=eds-live>
- Kantún, C., & Herrera-Silveira, J. (2015). *Influencia de las Descargas de Agua Subterránea en los almacenes de Carbono azul en dos praderas de pastos marinos en Yucatán*.
- Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., & Quaicoe, J. E. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86(10), 1823–1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>
- López, J., Silva, R., & Mendoza, E. (2011). Aprovechamiento de la energía de las corrientes con el Hidrogenerador IMPULSA. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, II, 97–110.
- Manzano, F., Corchete, V., & B. Lastra, X. (2007). Análisis espectral del registro de marea en la estación de Ceuta. *Ingeniería Civil*, (146), 103–109.
- Mariño-Tapia, I., Silva, R., Enríquez, C., Souza, A., López-González, J., Candela, J., & Sheinbaum, J. (2018). Assessment of the oceanic current energy potential on environmentally sensitive areas of the Mexican Caribbean. *SEEP2018*.
- Martínez, B., & Parés, A. (1998). Circulation in the Gulf of Mexico induced by tides, winds and the Yucatan Current. *Ciencias Marinas*, 24, 65–93.
- Martínez, E. (2014). *Diseño y optimización por medio de análisis exergéticos de una turbina hidrocínética para generación de energía eléctrica a partir de fluidos de bajo caudal*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Retrieved from <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/7140>
- Mateos, R. (2016). *Karst Springs- Los manantiales Kársticos*. *Enseñanza de las Ciencias* (Vol. 24.1).
- Mejía-Olivares, C. J., Haigh, I. D., Wells, N. C., Coles, D. S., Lewis, M. J., & Neill, S. P. (2018). Tidal-stream energy resource characterization for the Gulf of California, México. *Energy*, 156, 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.074>
- Molloy, S., Taylor, J., & P.Eng. (2013). *Tidal Power Extraction Devices*.
- OES. (2017). ANNUAL REPORT, AN OVERVIEW OF OCEAN ENERGY ACTIVITIES IN 2017 ANNUAL.
- Oran, E. (1988). *The Fast Fourier Transform and its applications*. (P. Hall, Ed.).
- Pacheco, A., Ferreira, Ó., Carballo, R., & Iglesias, G. (2014). Evaluation of the production of tidal stream energy in an inlet channel by coupling field data and numerical modelling. *Energy*, 71, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.075>
- Pinet, P. R. (2003). *Invitation to Oceanography*. (J. B. Learning, Ed.) (Sixth Edit).
- REN21. (2017). *Renewables 2017 Global Status Report 2017*.
- Riba, C. (2013). *Recursos energéticos y crisis. El fin de 200 años irrepetibles*. (Octaedro, Ed.). Retrieved from <https://is.upc.edu/publicaciones/libros/recursos-energetics-i-crisi.-el-fin-de-200-anos-irrepetibles>
- Roberts, A., Thomas, B., Sewell, P., Khan, Z., Balmain, S., & Gillman, J. (2016). Current tidal power technologies and their suitability for applications in coastal and marine areas. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2(2), 227–245. <https://doi.org/10.1007/s40722-016-0044-8>



- Schallenberg, J. C., Piernavieja, G., Hernández, C., García, R., Díaz, M., Cabrera, D., Subiela, V. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*.
- SENER. (2012). Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. *Diario Oficial de La Federación*, 1, 156. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- SENER.(2017a). *Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- SENER. (2017b). Reporte de Inteligencia Tecnológico Energía del Océano. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279710/IT\\_OCEANO\\_VERSION\\_3\\_11017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279710/IT_OCEANO_VERSION_3_11017.pdf)
- Ulloa, M., Olivares Torres, A., Díaz Maya, M., Hernández Adame, G. M., & Ortega Izaguirre, R. (2018). Observaciones de la potencia del oleaje en el sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, 2, 15–20.
- Valle-Levinson, A., Mariño, I., Enriquez, C., & Waterhouse, A. (2011). Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. *Limnology and Oceanography*, 56(4), 1213–1224. <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.4.1213>
- Vega de Kuyper, J. C., & Ramírez Morales, S. (2014). *Fuentes de energía, renovables y no renovables.Aplicaciones*. (Alfaomega, Ed.). [México]. Retrieved from <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://unam.bibliotecasdigitales.com/read/9786077078210>
- Vera, I., Mariño, I., & Enriquez, C. (2012). Effects of drought and subtidal sea-level variability on salt intrusion in a coastal karst aquifer. *Marine and Freshwater Research*, 63(6), 485–493. <https://doi.org/10.1071/MF11270>
- Vera Manrique, I. (2012). *Forzamientos Meteorológicos y Oceanográficos que gobiernan las descargas submarinas del acuífero en*. Centro de Investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- Villasuso Pino, M. J., Sánchez y Pinto, I. A., Canul Macario, C., Casares Salazar, R., Baldazo Escobedo, G., Souza Cetina, J., ... Pech Argüelles, C. (2011). Hydrogeology and conceptual model of the karstic coastal aquifer in northern Yucatan state, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(October 2016), 243–260.
- Zamora, M. N. (2012). *Análisis fluidodinámico en una turbina helicoidal GHT para generación de energía mareo-motriz*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4919.5847>