

UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
SEDE “Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**DIAGNÓSTICO DE LAS POTENCIALIDADES DE LA
ENERGÍA MAREOMOTRIZ PARA LA OBTENCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MUNICIPIO DE GIBARA**

LÁZARO GIRÓN MATOS

HOLGUÍN
2016

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
SEDE “Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES**

TRABAJO DE DIPLOMA

**DIAGNÓSTICO DE LAS POTENCIALIDADES DE LA
ENERGÍA MAREOMOTRIZ PARA LA OBTENCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MUNICIPIO DE GIBARA**

Autor: LÁZARO GIRÓN MATOS

Tutores: MSc. Raymundo C. Rodríguez Tejeda

Ing. Yusleydis Cano Ricardo

HOLGUÍN

2016

Pensamiento

"(...) si pudiéramos dominar el 0,1 por ciento de la energía en los océanos, podríamos sustentar las necesidades energéticas de 15.000 millones de personas"

Michael M. Bernitsas

Agradecimientos

A mis padres por darme su apoyo y su influencia en mi educación.

A mi novia por darme su compañía y su ayuda.

A mi hermana.

A mi tutora por su dedicación.

A mi tutor por su ayuda.

A mis compañeros de aula que me acompañaron en este viaje.

A mis amigos Tito, Willy, Daril, Rey, Frank y a los que no mencioné, también.

Dedicatoria

A mis padres que lo dieron todo para que yo llegara hasta aquí

A mis profesores por sus enseñanzas

A la revolución cubana que me dio la oportunidad de hacerme un profesional.

Resumen

Las energías alternativas renovables son la opción más ecológica y razonable de generar electricidad. La energía mareomotriz tiene la cualidad de ser renovable, pues su fuente de energía primaria no se agota, y es limpia. Sin embargo, en Cuba no se ha implementado la explotación de este recurso natural debido a su alto costo, y al desconocimiento de su potencialidad en las zonas costeras, obstaculizando su empleo para la generación de energía eléctrica. Por lo que se hizo necesario diagnosticar las potencialidades de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica debido a las condiciones geográficas presente en la costa. Se determinó la potencia del sistema en un año para las velocidades de corrientes de 0.5 m/s y 1 m/s. La solución del problema de la investigación y el cumplimiento del objetivo fue posible con la implementación de un sistema de métodos de investigación científica de naturaleza teórica, empírica y estadística – matemática.

Abstract

Renewable alternative energies are the most environmentally friendly and reasonable option to generate electricity. Tidal energy has the quality of being renewable, as its primary energy source is not exhausted, and it is clean. However, in Cuba it has not implemented the exploitation of this natural resource because of its high cost, and ignorance of their potential in coastal areas, hampering their use for power generation. So it was necessary to diagnose the potential of tidal power in the municipality of Gibara for power generation due to geographical conditions present in the coast. System power in one year for current velocities of 0.5 m / s and 1 m / s was determined. The solution of the problem of research and meeting the target was possible with the implementation of a system of scientific research methods of theoretical, empirical and statistical nature - mathematics.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO-I: CARACTERIZACIÓN DEL EMPLEO DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	7
1.1 Proceso de generación de la energía eléctrica	8
1.2 Antecedentes históricos del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica	10
1.3 Fuentes de energía provenientes del mar	11
1.3.1 Energía mareomotriz. Principio de funcionamiento	12
1.3.1.1 Mareas. Conceptualización y caracterización	17
1.3.1.2 Corrientes marinas	21
1.4 Métodos de generación de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz	23
1.4.1 Turbinas empleadas en la generación de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz	25
1.5 Experiencias del empleo de la energía mareomotriz en el mundo	38
1.6 Conclusiones del capítulo	40
CAPÍTULO-II: POTENCIALIDADES DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MUNICIPIO GIBARA	41
2.1 Estado actual del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara	42
2.2 Criterios generales a tener en cuenta para la aplicación de los métodos de generación de energía eléctrica	47
2.2.1 Características principales de la zona de estudio	48
2.3 Selección del método de generación	48

2.4 Evaluación de la potencia generada con el uso del sistema VIVACE en el municipio Gibara	52
2.5 Conclusiones del capítulo.....	61
CONCLUSIONES GENERALES.....	62
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXOS	67

INTRODUCCIÓN

La evolución de las sociedades a nivel mundial ha estado acompañada de una dependencia de dispositivos eléctricos que demandan grandes cantidades de energía para trabajar. A medida que las sociedades incrementan su confort en el estilo de vida, la demanda de energía es mayor.

Actualmente los sistemas que generan electricidad (excepto hidráulicos, eólicos y solares) producen residuos contaminantes, además la mayoría de ellos son recursos no renovables los cuales debido a la creciente demanda energética se están extinguiendo con mayor rapidez. Hoy en día las energías alternativas renovables son la opción más ecológica y razonable de generar electricidad. Sin duda, el océano es una de estas fuentes de energía renovable, ya que, en él, se concentra la energía del sol, el viento y las fuerzas de atracción del sol y la luna (Portal del Ingeniero Ambiental, 2016).

El océano tiene una cantidad enorme de energía, muchos estudios muestran que esta cantidad es de alrededor de cinco millones de MW, pero por supuesto la realidad es que solo una fracción mínima de esta energía es posible aprovechar.

Las mareas de los océanos constituyen una fuente gratuita, limpia e inagotable de energía, es decir, el movimiento de las aguas del mar, producen una energía que se transforma en electricidad en las centrales mareomotrices. Se aprovecha la energía liberada por el agua de mar en sus movimientos de ascenso y descenso de las mareas, y es una de las nuevas formas de producir energía eléctrica.

La energía mareomotriz tiene la cualidad de ser renovable, en tanto que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación, y es limpia. La transformación energética no produce subproductos contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos. Esta aprovecha la energía cinética y potencial que ejercen las mareas, para producir energía eléctrica transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, por lo que podemos afirmar que es una forma energética más útil y aprovechable (wikipedia, 2016).

Sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el coste económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una proliferación notable de este tipo de energía.

Esta energía es un recurso hidráulico que tiene analogía con la hidroelectricidad, la energía mareomotriz podría aportar unos 635.000 gigavatios/hora (GW/h) anuales equivalentes a 1.045.000.000 barriles de petróleo o 392.000.000 toneladas de carbón/año (López, 2014).

La cantidad de energía que es posible aprovechar, está directamente relacionada con la amplitud de la marea. Hay varios lugares en el mundo que presentan las condiciones óptimas para aprovechar las mareas para la generación de energía, con variaciones de hasta 16 m. Estudios internacionales han convertido a los países líderes en la utilización de este tipo de energía a Corea del Sur con la planta Sihwa Lake con una producción de 254 MW, Francia con La Rance de 240 MW situada en el estuario del río Rance, en Bretaña y en Reino Unido la planta Tidal Lagoon de 240 MW (Rodríguez, En construcción -Energía y Electrónica, 2014).

A pesar de ser Cuba una isla, las mareas que habitualmente se producen no son lo suficientemente grandes como para que se puedan obtener importantes cantidades de energía a partir de esta fuente. No obstante, en algunos lugares de la isla se experimentan diferentes modalidades que podrían dar resultados al menos para soluciones locales. Las características de las bahías de la costa nororiental del país, son bolsas con canales de entradas largos y profundos, en los cuales se forman corrientes con velocidades entre 1 y 2.5 metros por segundo que podrían aprovecharse para generar electricidad. De hecho existen en este momento al menos cuatro universidades y la empresa cubana Geocuba, que trabajan en un estudio con una duración estimada de 3 años para la construcción de una planta piloto de un MW de potencia con fines experimentales y que cumplirá el mismo objetivo que el parque eólico de Turiguanó (Energía Mareomotriz, 2016).

El estudio antes citado nos incita a realizar un diagnóstico de las potencialidades que tiene la energía mareomotriz en algunos puntos, particularmente en la costa del

municipio de Gibara, para la posible ubicación de dispositivos generadores de electricidad a partir de esta fuente, revelándose así la contradicción fundamental de esta investigación; para poder emplear la energía mareomotriz como fuente para la generación de energía eléctrica es necesario diagnosticar sus potencialidades.

De esta manera se plantea como problema de la investigación: El desconocimiento de las potencialidades de la energía mareomotriz en la zona costera del municipio de Gibara obstaculiza su empleo para la generación de energía eléctrica.

Objeto de la investigación:

El proceso de generación de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz

Campo de acción:

Las potencialidades que ofrece la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica.

Objetivo general:

Diagnosticar las potencialidades que manifiesta la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica.

Objetivos específicos:

- Determinar los antecedentes históricos que han caracterizado el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica.
- Sistematizar los fundamentos teóricos – metodológicos que sustentan el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica.
- Determinar el estado actual del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara.
- Diagnosticar las potencialidades que presenta el empleo de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica.

Preguntas científicas:

- ¿Qué antecedentes históricos han caracterizado el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica?
- ¿Qué fundamentos teóricos – metodológicos han sustentado el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica?
- ¿Cuál es el estado actual del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara?
- ¿Cómo diagnosticar las potencialidades que presenta el empleo de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica?

Tareas de la investigación:

- Determinación de los antecedentes históricos que han caracterizado el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica.
- Sistematización de los fundamentos teóricos – metodológicos que sustentan el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica.
- Determinación del estado actual del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara.
- Diagnóstico de las potencialidades que presenta el empleo de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica.

Métodos de la investigación:

- Métodos Teóricos:
 - Análisis – síntesis: Para la sistematización de los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica.
 - Histórico – lógico: Para la determinación de los antecedentes históricos del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica.

- Hipotético – deductivo: Para la elaboración de la hipótesis de trabajo.
- Modelación: Para la preparación del diagnóstico de las potencialidades de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara.
- Métodos Empíricos:
 - Análisis documental: Para la caracterización del proceso de generación de energía eléctrica a partir del empleo de la energía mareomotriz.
 - Entrevista: Para la caracterización del proceso de generación de energía eléctrica a partir del empleo de la energía mareomotriz.
 - Consulta a especialistas: Para la valoración del diagnóstico de las potencialidades de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica.
- Métodos Estadísticos –matemáticos:
 - Estadísticos descriptivos: Para la organización y presentación de los resultados obtenidos.

El aporte de esta investigación consiste en el diagnóstico de las potencialidades del empleo de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara, para la generación de energía eléctrica.

En el municipio de Gibara no se tienen estudios del potencial mareomotriz para la obtención de energía eléctrica, aunque se han realizado investigaciones en otras provincias, constituyendo esta la novedad científica de la investigación.

Tanto las investigaciones como la construcción de las plantas mareomotrices desarrolladas en países europeos y en otras partes del mundo, están teniendo gran auge en la implementación de las mismas para la obtención de energía. Actualmente nuestro país está abogando por implementar esta tecnología siendo así la actualidad de nuestro tema de investigación.

El trabajo de diploma está estructurado en dos capítulos. En el primer capítulo se realiza una caracterización histórica, teórico – metodológica y empírica de las potencialidades de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica. En el segundo capítulo se elabora un diagnóstico de las potencialidades de la energía mareomotriz para la obtención de energía eléctrica en el municipio de Gibara.

CAPÍTULO - I:
CARACTERIZACIÓN DEL EMPLEO DE LA
ENERGÍA MAREOMOTRIZ PARA LA GENERACIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Introducción al capítulo:

En este capítulo se abordan los aspectos que caracterizan el empleo de la energía mareomotriz como fuente para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara en relación a su marco histórico y sus fundamentos teóricos – metodológicos, teniendo en cuenta investigaciones anteriores que reflejan los conocimientos adquiridos a lo largo de su evolución y desarrollo.

1.1 Proceso de generación de la energía eléctrica

La manera más habitual de producir electricidad se basa en transformar la energía eléctrica contenida en energía primaria en energía mecánica a través de diferentes procesos, para con ayuda de un generador, poder convertir esta energía en electricidad. Cuando la energía eléctrica es transformada en energía mecánica, el dispositivo se denomina motor y cuando se convierte energía mecánica en energía eléctrica, el dispositivo se denomina generador. La generación de electricidad tiene lugar en las centrales de producción que pueden ser de diversos tipos, según la tecnología que emplean (¿Cómo se genera la electricidad?, 2012).

- Central nuclear: es un tipo de central en la que el agua se calienta a alta presión mediante el calor liberado en la fisión nuclear. Ese vapor a presión, al igual que los casos anteriores, moverá una turbina conectada a un generador eléctrico.
- Central hidráulica: este tipo de instalaciones suele estar situada en embalses donde se acumula el agua. La electricidad se obtiene mediante el giro de las turbinas, conectadas a un generador, que se mueven mediante el agua almacenada que cae desde gran altura.
- Parque eólico: estas centrales están formadas por aerogeneradores. Estos molinos eólicos poseen unas aspas, que sería equivalente a las turbinas de las otras centrales, y un generador. La electricidad se genera orientando las palas al viento para que éste las mueva.

- Huerto solar: es el nombre que recibe las centrales que generan la electricidad a partir de la radiación solar. Este caso es el único que no emplea la energía mecánica, sino que genera la electricidad a través de una serie de reacciones químicas que se producen en los paneles solares.
- Central geotérmica: emplea el calor del interior de la tierra para calentar agua a alta temperatura y presión, la cual se encarga de mover una serie de turbinas conectadas a un generador. Estas centrales se instalan en zonas donde el suelo alcanza altas temperaturas a bajas profundidades.
- Central mareomotriz: estas instalaciones están todavía en investigación para mejorar su eficiencia, aunque existen ya algunas situadas en océanos con grandes mareas como el océano Atlántico. El funcionamiento se basa en utilizar las corrientes de las mareas para movilizar una turbina conectada a un generador.
- Parque undimotriz: esta central, se encuentra todavía en fase de desarrollo, genera la electricidad utilizando el movimiento de las olas de mar para mover las turbinas.

Todas estas centrales, excepto las fotovoltaicas, tienen en común el elemento generador en sí, que no es otro que un alternador, movido mediante una turbina, que será distinta dependiendo del tipo de energía primaria utilizada. Por tanto, la generación de la electricidad es un proceso muy variado dependiendo de la energía primaria utilizada. Aunque las centrales de carbón, gasóleo, gas natural, nucleares e hidráulicas son las más extendidas en todo el planeta, actualmente, se está potenciando especialmente el uso de energía primaria renovable para disminuir la contribución de la generación de electricidad al cambio climático.

1.2 Antecedentes históricos del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica

Los antecedentes más antiguos del empleo de la energía mareomotriz se remontan a la Edad Media, en Inglaterra (siglo XIII), en la que se fabricaron molinos para moler trigo basados en el aprovechamiento de las mareas en la desembocadura de ríos donde éstas poseían cierta amplitud (Martínez, 2012). Desde 1581 hasta 1822, en Londres, capital de Inglaterra, funcionó sobre el río Támesis, una gran rueda movida por la marea, que permitía bombear el agua hasta el centro de la ciudad (ver anexo 1 y 2).

Posteriormente, en el siglo XVIII, tanto en Francia como en la costa oriental de Estados Unidos, aparecen nuevas instalaciones mareomotrices destinadas a moler grano o especies: sólo en EEUU se registraron más de 250 patentes referidas a ingenios que se basaban en el aprovechamiento de las mareas, pero al igual que otras fuentes de energía renovable que habían sido aprovechadas desde la antigüedad, la aparición de la electricidad en las centrales térmicas a precios muy económicos hizo que disminuyera enormemente el interés.

Sin embargo, el entusiasmo por los proyectos mareomotrices no se vio reflejado con éxito hasta la década de los 60, cuando se implantó por vez primera una central mareomotriz en La Rance, cerca de Sant Malo, en la Bretaña Francesa. Esta central, construida entre 1961 y 1967 y con una potencia eléctrica instalada de 240 MW, se combinó con la construcción de una carretera que cruzaba el estuario (anexo 3)

Aparte de la central mareomotriz de La Rance, otras instalaciones que se encuentran operativas son: una unidad de 400 kW en la Bahía de Kislaya, a 100 km de Murmansk (Rusia), completada en 1968; otra en la de la cala de Jangxia, en el mar de la China del Este, de una potencia de 500 kW y la central de Annápolis Royal, en Nueva Escocia (Canadá), terminada en 1984 con una única unidad de 18 MW.

Actualmente, muchos de los programas gubernamentales referentes a la energía mareomotriz y a diseños de nuevas centrales están completamente parados, porque no pueden competir con el bajo precio de la energía eléctrica generada por las centrales convencionales. Sin embargo, cabe mencionar algunos proyectos interesantes en perspectiva de cara a un futuro no muy lejano, como el emplazamiento del estuario de la Bahía de Severn y de la Bahía de Mersey, en Inglaterra y los proyectos de la Bahía de Fundi en Nueva Escocia, entre Estados Unidos y Canadá.

1.3 Fuentes de energía provenientes del mar

Los océanos cubren más del setenta por ciento del planeta, concebimos a estos como lugar de recursos inmensos y desde hace mucho tiempo han sido considerados como una fuente inmensa de energía renovable. Las ideas son variadas y van desde la energía mareomotriz hasta el aprovechamiento de gradientes térmicos. Se espera que puedan llegar a jugar un papel fundamental en el futuro, por lo que su impulso y desarrollo es crucial para el desarrollo energético.

Son variadas las formas de aprovechar el potencial que ofrecen los océanos, como, por ejemplo (Energía marina, 2016):

- La energía undimotriz: producida por el movimiento de las olas. Esta fuente de energía resulta ser muy irregular, a consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar, por lo que se han desarrollado múltiples prototipos capaces de aprovechar su energía.
- La energía mareomotriz: trata de obtener energía del ascenso y descenso del mar provocado por las mareas debido a la acción gravitatoria del sol y la luna.
- Energía de las corrientes: radica en la explotación de la energía cinética contenida en las corrientes marinas que están ocasionadas por las diferencias, de temperatura, sal, densidad, así como la rotación de la tierra y la evaporación.

- Potencia osmótica: consiste en la explotación energético del gradiente salino, que aprovecha la diferencia de concentración de sal entre las aguas del mar y la de los ríos.
- Maremotérmica: Consiste en la utilización de la energía térmica del mar, asentado en la diferencia de temperaturas entre la superficie del mar y las aguas profundas.
- Biomasa marina: Los microbios componen hasta el noventa por ciento de la biomasa marina, la cual presenta una enorme cantidad de energía para la producción de biocombustibles.

De manera general se puede plantear que los recursos energéticos de los océanos son inmensos, en todas sus manifestaciones. Por todo lo expuesto, se dice que los océanos se comportan en la naturaleza como una fuente térmica de inapreciable valor.

1.3.1 Energía mareomotriz. Principio de funcionamiento

Existen diferentes tipos de instalaciones para convertir energía mareomotriz generalmente en energía eléctrica. El principio de conversión de energía consiste en el uso de una diferencia de niveles de agua oceánica a ambos lados de un dique que encierra un área oceánica. La diferencia de niveles causa una diferencia de presiones de agua dentro y fuera del dique, y bajo esta diferencia de presiones los chorros de agua que pasan a través del dique hacen rotar sistemas hidroturbinas-generadores produciendo de este modo energía eléctrica.

El uso de dicho principio tradicional de producción de energía eléctrica tiene una desventaja cardinal: la energía eléctrica no se genera constantemente, sino cíclicamente conforme a los ciclos de mareas. Esto significa que hay una secuencia de periodos alternantes de ausencia y generación de energía eléctrica con un periodo igual al periodo de mareas oceánicas (aproximadamente 6 horas), que en la práctica causa serias incomodidades al usar la energía eléctrica obtenida por medio de dicho principio (Portal del Ingeniero Ambiental, 2016).

A continuación, para realizar el cálculo de la máxima energía que se puede extraer de una masa de agua situada a una determinada altura potencial h , (ver figura 1.1) se presupondrá que el estuario tiene una superficie constante S , que permanece en todo momento cubierta de agua y que, además, se puede considerar que toda la masa de agua está concentrada en su centro de gravedad $h/2$ (Portal del Ingeniero Ambiental, 2016).

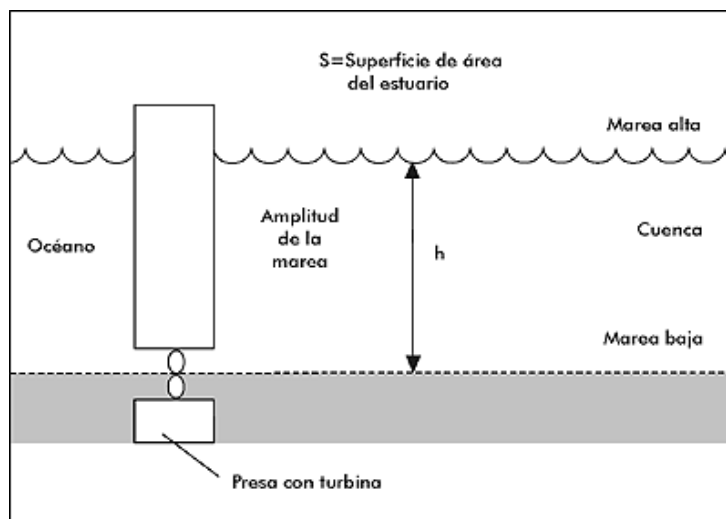


Figura 1.1 Perfil simplificado de una central mareomotriz.

(Fuente: Libro Energía de las mareas)

Si h es la amplitud de la marea y se considera el producto (ρSh) como la masa de agua contenida detrás de la barrera y que, supuestamente, se vaciará totalmente durante la bajamar, se deduce que la máxima energía potencial disponible vendrá dada por la propia fórmula de la energía potencial:

$$E = p \times S \times h \times g \times \left(\frac{h}{2}\right) = \frac{p \times g \times S \times h^2}{2} \quad (\text{Ecu. 1.1})$$

donde:

E = energía potencial (J).

ρ = densidad del agua del mar (kg/m).

S= superficie de agua del estuario (m²).

h= amplitud de la marea (m).

g= aceleración de la gravedad (9,8 m/s²).

A partir de la energía, se puede deducir la potencia media obtenida por marea:

$$P = \frac{p \times g \times S \times h^2}{2 \times T} \quad (\text{Ecu. 1.2})$$

donde:

P= potencia media (W).

p = densidad del agua mar (kg/m³).

S= superficie de agua del estuario (m²).

h= amplitud de la marea (m).

g= aceleración de la gravedad (9,8 m/s²).

T= período de la marea (s).

De las fórmulas anteriores se deduce que, con las hipótesis asumidas, la potencia media de una barrera mareomotriz depende del cuadrado de la amplitud de la marea y, a la vez, es proporcional a la superficie total del agua atrapada en la parte posterior de la dársena. Estos dos parámetros indican que los principales requerimientos para un proyecto mareomotriz son geográficos y geológicos. Por ello, la localización ideal se ubica en un entrante o estuario largo y ancho con una gran subida y bajada de la marea.

De esta forma, el factor emplazamiento es crucial para la viabilidad de una central de mareas (necesidad de poca obra civil para disponer de grandes volúmenes de agua).

Este tipo de energía y la utilización de las turbinas para la obtención de la energía eléctrica presenta grandes ventajas que la hacen un recurso de mucha factibilidad, pero a su vez también presenta algunas desventajas que pueden ser un obstáculo para su implementación y desarrollo en el mundo.

- Ventajas
 - Recurso renovable

La energía mareomotriz es una fuente de energía renovable. Esta energía es el resultado de los campos gravitatorios de la luna y el sol, combinados con la rotación terrestre sobre su eje, y que ocasiona mareas altas y bajas. Es esta diferencia de energía potencial de las mareas la que se puede usar para generar electricidad, ya sea mediante generadores de corrientes de mareas (o TSG, por las siglas en inglés de Tidal Stream Generators), presas de mareas o la más reciente, energía mareomotriz dinámica (DTP o Dynamic Tidal Power).

- Energía limpia

La energía mareomotriz es una fuente de energía respetuosa con el medioambiente y no emite ningún gas de efecto invernadero.

- Es predecible

Las mareas son predecibles, sabemos cuándo ocurren las mareas altas y cuando baja la mar. Al conocer estos ciclos, se hace más fácil la construcción de sistemas con las dimensiones adecuadas, puesto que se puede conocer qué potencia esperar en cada caso.

- Son eficientes a bajas velocidades

Puesto que el agua es 1000 veces más densa que el aire, es posible generar electricidad a baja velocidad. Incluso con velocidades de 1 m/s puede obtenerse energía.

Presentan una larga vida útil. Aunque como se ha dicho todavía hay pocos ejemplos, la planta mareomotriz de La Rance en Francia lleva en funcionamiento desde 1966 y hoy en día sigue produciendo gran cantidad de electricidad.

- Desventajas
 - Impacto sobre la biodiversidad marina

Los efectos de las plantas mareomotrices en el medioambiente pueden ser irremediables. Si las comparamos con las presas hidroeléctricas, que de manera similar bloquean el paso libre del agua, podrían tener efectos parecidos en hábitats marinos, es sencillo imaginar que los alabes de las turbinas girando pueden hacer pedacitos a los peces que pasen por allí, además existe un riesgo bastante alto de alterar la salinidad del agua de la zona e incluso la temperatura del agua y posiblemente tenga efectos negativos en los mamíferos marinos que usan el estuario como su hábitat. Por ello, los proyectos de investigación también ponen especial acento en este aspecto.

- Cercanía a tierra

Las centrales mareomotrices requieren ser construidas cerca de tierra firme que es donde se dan las diferencias más marcadas entre mareas. Esto conlleva a un impacto visual por la ocupación de zonas costeras, además de la afectación del emplazamiento para su uso en el comercio y en el desarrollo de la economía del país como posible destino portuario. En un futuro, quizás sea posible situarlas en zonas de alta mar.

- Elevados costos de construcción

Al ser unas tecnologías nuevas resultan menos competitivas que otras establecidas y potenciadas desde hace más tiempo, y la energía resultante es significativamente más cara que la obtenida con centrales nucleares, térmicas, u otras fuentes de energía renovables. Los gobiernos pueden llegar a financiar las centrales mareomotrices, pero muchos se rehúsan a hacerlo debido al tiempo que tardan en volver las inversiones y al nivel alto de un compromiso irreversible

1.3.1.1 Mareas. Conceptualización y caracterización

Es el movimiento vertical oscilatorio, periódico y alternativo ascendente y descendente de las aguas. Es producido por la acción gravitatoria principalmente de la luna y en menor medida del sol que se ejerce sobre nuestro planeta y la masa de agua que lo rodea al ser esta incomprensible se encuentra en constante movimiento, esta es un fenómeno natural de gran utilidad tanto para los procesos planetarios, como para la propia vida del hombre.

Las mareas se caracterizan por presentar tres fases cíclicas, esto es, que se repiten una o dos veces al día. Comienzan con una subida del nivel del mar hasta alcanzar un punto crítico de altura, luego este nivel desciende hasta llegar a su valor más bajo y entonces el ciclo vuelve a comenzar. Las mareas que ocurren una vez al día se llaman mareas diurnas, las que suceden dos veces al día se llaman mareas semidiurnas (Forcadell, 2011).

Entre la subida de la marea y la bajada corren alrededor de 12 horas; sin embargo, como no siempre la luna gira alrededor de nuestro planeta en el mismo lugar a la misma hora, se produce un cambio diario de 50 minutos (Batanga, 2016).

Existen dos tipos de mareas. Una en función del valor de la altura de la marea y la otra por las fases de la luna que está directamente relacionada con la acción media de los peces en las tablas solunares.

- Según la altura de la marea

Marea alta o pleamar: cuando el agua del mar alcanza su altura más alta dentro del ciclo de las mareas

Marea baja o bajamar: cuando el agua del mar alcanza su altura más baja dentro del ciclo de las mareas

Normalmente se producen dos pleamares y dos bajamares por día lunar ya que, al mismo tiempo que la Luna eleva el agua sobre la Tierra en el lado que mira hacia ella, también separa la Tierra del agua en el lado opuesto.

- Según la fase de la luna

Mareas vivas o sicigia: Durante las fases de luna llena y luna nueva, la Luna y el Sol están alineados y sus efectos se suman. Existe un comprobado aumento en la actividad de los peces cuando se producen mareas vivas, sobre todo si estas coinciden con el amanecer o el ocaso, siendo éstos los días más propicios para la pesca.

Mareas muertas o de cuadratura: Durante las fases de cuarto creciente y cuarto menguante, por el contrario, los efectos se restan, obteniéndose mareas de menor amplitud (coeficiente de mareas más bajo), denominadas mareas muertas. El movimiento en los fondos marinos suele ser menor y normalmente resultan días menos propicios para la pesca que los días con mareas vivas.

En la formación del desarrollo de las mareas influyen diferentes factores. Las mareas son originadas por la atracción que ejerce la Luna sobre las aguas. La Luna, a medida que efectúa la rotación alrededor de nuestro planeta, levanta con su fuerza de atracción las masas de agua dirigidas hacia ella, mientras que las que se hallan en los antípodas suben casi lo mismo debido a la fuerza centrífuga de la rotación terrestre. Aun sin la influencia de la Luna, nuestros océanos y mares tendrían mareas, aunque menos vivas.

La atracción gravitacional del Sol influye también sobre la Tierra. Esta fuerza, mucho más fuerte en su origen que la que ejerce la Luna, influye menos debido a la distancia que nos separa del Sol. Las mareas causadas por el Sol pueden reforzar o debilitar las que son creadas por la acción de la Luna.

Cuando el Sol y la Luna están alineados, durante la luna llena o luna nueva, sus fuerzas gravitacionales actúan en conjunto creando una atracción mucho más fuerte que causa mareas más altas. Las llamamos mareas de primavera, aunque no se limitan a esa estación. Cuando el Sol y la Luna guardan un ángulo recto respecto a la Tierra, en los cuartos menguante y creciente, la atracción del Sol influye en lo que se conoce como mareas muertas (Historia y biografías, 2016).

Hay varios lugares en el mundo que presentan las condiciones óptimas para aprovechar las mareas para la generación de energía, con variaciones de hasta 16 m. Hoy en día, el desarrollo de las turbinas solo permite aprovechar carreras de mareas mayores a 5 m y por el momento, rangos de mareas menores a 5 m no son convenientes en virtud que su eficiencia es muy baja. La figura 1.3 muestra los sitios a nivel mundial que tienen mareas importantes, entre las cuales cabe destacar: Severn River (Reino Unido), Kimberleys (Australia), Cabo Tres Puntas (Argentina), passamaquoddy (U.S.A) y la bahía Fundy (Canadá) (Charlier, 2002)

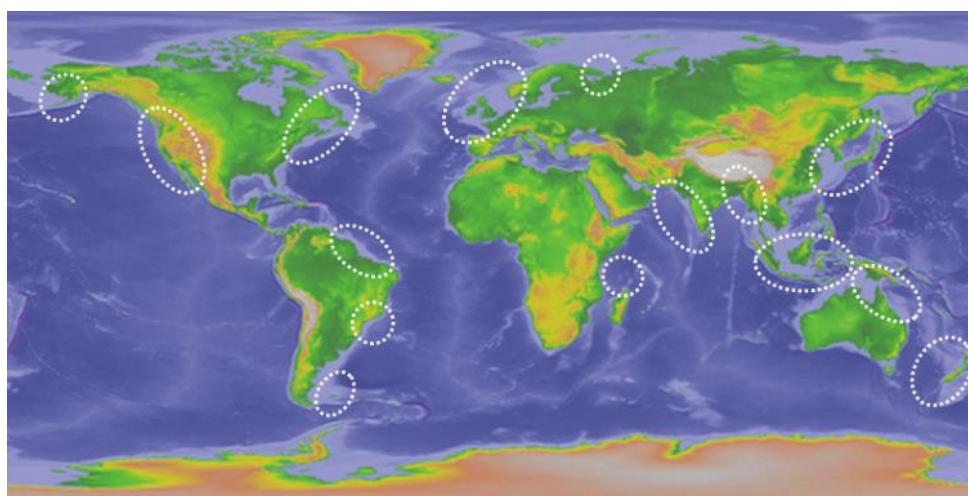


Figura.1.2 Sitios en el mundo con importantes rangos de marea
Fuente (Gonzales, 2009)

Algunos de estos sitios ya cuentan con instalaciones, y otros sitios en estudio con buen potencial mareomotriz se muestran en la (tabla 1.1). Corea y China han estudiado la posibilidad de construir algunas instalaciones y han estimado alrededor de 2000 GWh por año de producción anual con plantas mareomotrices un Shiwa, Garolim Incheom.

Tabla.1.1 Emplazamientos más destacados para el aprovechamiento de centrales

País	Emplazamiento	Altura media de la marea	Superficie embalsada	Potencia estimada	Producción aproximada
		m	km ²	MW	GWh/AÑO
Argentina	San José	5.9	778	5040	9400
	Santa cruz	7.5	222	2420	
	Rio gallegos	7.5	177	1900	
Australia	Bahía de secure	7	140	1480	
	ensenada de walcoott	7	260	2800	
Canadá	Cobequid	13.4	240	5338	14000
	Cumberland	10.9	90	1400	
	Shepody	10	115	1800	
Rusia	Bahía de Mezen	6.76	2640	15000	45000
	Penzhinsk, mar de okhost	11.4	530	87400	
		6.8	1080	7800	
	Bahía de tugur				
USA	Turnagain arm	7.5		6500	16600
	Knit arm	7.5		2900	
	Passamaquoddy	5.5			

India	Golfo de khambat	6.8	1970	7000	15000
	Golfo de kutch	5	170	900	
UK	Severn	7	520	8640	17000
	Mersey	6.5	61	700	
	Duddon	5.6	20	100	
	Wyre	6	5.8	64	
	Conwy	5.2	5.5	33	
Corea	Garolim	4.7	100	400	
	Cheonsu	4.5			
		6.7			
México	Rio Colorado	6.7			

Fuente: <http://www.termica.webhob.info>

1.3.1.2 Corrientes marinas

Una corriente oceánica o marina es un movimiento superficial de las aguas de los océanos y en menor grado, de los mares más extensos. Estas corrientes tienen multitud de causas, principalmente, el movimiento de rotación terrestre y por los vientos constantes o planetarios y la principal para la producción de la corriente de marea, las mareas.

Generalmente se originan por la diferencia de densidad del agua, que es mayor cuanto más fría y/o salada sea, tendiendo a hundirse para dar lugar a una circulación condicionada por la diferencia de temperatura y/o salinidad en un eje vertical. Este movimiento tiende a descender, provocando el afloramiento del agua más profunda y cálida para ocupar un lugar. Este descenso puede verse dificultado por el aporte del agua dulce, como podría ser la desembocadura de un río (intercuba, 2016).

- Tipos de corrientes marinas

Corrientes oceánicas: Son producidas por el movimiento de rotación terrestre por lo que presentan un movimiento constante. Puede ser creada también por los vientos constantes o vientos planetarios, de desplazamientos producidos por efecto de la inercia.

Estas corrientes relativamente estables en el tiempo y el espacio atraviesan océanos, bordean y bañan costas de continentes completos y son portadoras de un potencial energético incalculable. Pero desgraciadamente las profundidades oceánicas, las variaciones constantes del tiempo marítimo, unido al aún débil desarrollo tecnológico alcanzado, hacen todavía un sueño su explotación.

La energía de estos mega flujos se podría utilizar en zonas costeras ocupadas por estas corrientes de gradiente oceánicas, o desde instalaciones en dispositivos flotantes (barcos, patanas ancladas), o con equipos diseñados con anclajes en aguas profundas.

Corrientes de deriva litoral: Constituyen la resultante de la acción de las corrientes oceánicas al llegar a las costas cuyo trazado presenta alguna inclinación o desviación con respecto a la dirección original de las mismas.

Corrientes de oleaje: Son las que modifican en gran parte el litoral y son producidas por los vientos, en especial, por las tempestades o huracanes que se asocian al movimiento de las masas de aire tanto de origen continental como marítimo.

Corriente de marea: Las corrientes formadas por la atracción de la Luna y el Sol se llaman corrientes de marea y son grandes masas de agua que se aprecian en las costas, ríos y bahías; tienen un carácter de periodicidad y su dirección depende de la configuración de la costa. Esta corriente es la utilizada principalmente para el funcionamiento de una turbina mareomotriz, ya que esta es la energía mareomotriz.

Corrientes de densidad: Es la presencia vertical de dos masas de agua con distinta densidad y se presentan en los lugares de contacto entre aguas de distinta

Temperatura: una fría a mayor profundidad, por su mayor densidad, y otra cálida en la superficie.

1.4 Métodos de generación de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz

Para la obtención de la energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz se implementan los métodos que a continuación se mencionan y se relacionan en países de Europa, América latina Australia y Asia.

- Generador de la corriente de marea

Los generadores de corriente de marea hacen uso de la energía cinética del agua en movimiento a las turbinas de la energía, porque la energía cinética se genera por el flujo del caudal de agua en el caso de las mareas, se puede aprovechar eficientemente ése flujo de energía transformando el movimiento de desplazamiento en un movimiento de rotación por medio de turbinas. La turbina convenientemente acoplada a un generador eléctrico produce la energía eléctrica, de manera similar al viento (aire en movimiento) que utilizan las turbinas eólicas. Este método está ganando popularidad debido a costos más bajos y a un menor impacto ecológico en comparación con las presas de marea (figura 1.3) (Wikipedia, 2016).



Figura 1.3 Generador de corriente de marea

Fuente: (Wikipedia, 2016)

- Presa de marea

Las presas de marea hacen uso de la energía potencial que existe en la diferencia de altura (o pérdida de carga) entre las mareas altas y bajas. Las presas son esencialmente los diques en todo el ancho de un estuario, y sufren los altos costes de la infraestructura civil, la escasez mundial de sitios viables y las cuestiones ambientales (figura 1.4) (Wikipedia, 2016).

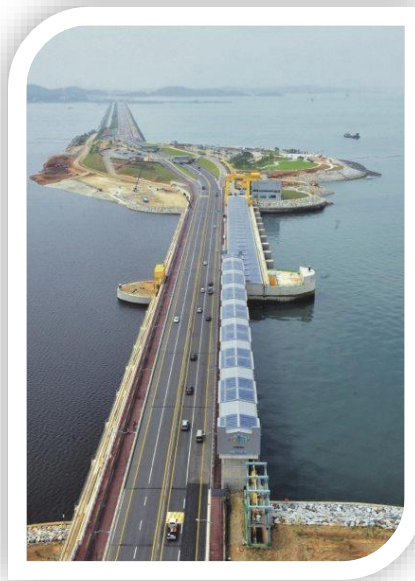


Figura 1.4 Presa de marea
Fuentes (Wikipedia, 2016)

- Energía mareomotriz dinámica

La energía mareomotriz dinámica (Dynamic tidal Power o DTP) es una tecnología de generación teórica que explota la interacción entre las energías cinética y potencial en las corrientes de marea. Se propone que las presas muy largas (por ejemplo: 30 a 50 km de longitud) se construyan desde las costas hacia afuera en el mar o el océano, sin encerrar un área.

Se introducen por la presa diferencias de fase de mareas, lo que lleva a un diferencial de nivel de agua importante (por lo menos 2,3 metros) en aguas marinas ribereñas poco profundas con corrientes de mareas que oscilan paralelas a la costa, como las que encontramos en el Reino Unido, China y Corea. Cada represa genera energía en una escala de 6 a 17 GW (figura 1.5) (Wikipedia, 2016).



Figura 1.5 Energía mareomotriz dinámica
Fuente: (Wikipedia, 2016)

1.4.1 Turbinas empleadas en la generación de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz

Para la aplicación y puesta en marcha de los métodos de extracción de electricidad antes descritos se hace necesario el uso de grandes turbinas de conversión.

Las turbinas son dispositivos mecánicos que convierte la energía de las corrientes submarinas en energía eléctrica. Consiste en aprovechar la energía cinética de las corrientes submarinas, fijando al fondo submarino turbinas montadas sobre torres prefabricadas para que puedan rotar en busca de las corrientes submarinas.

Las turbinas diseñadas para aprovechar la energía de las corrientes de las mareas se basaron en los diseños de las turbinas eólicas. Es por esto que en general las

tecnologías de Mareogeneradores se dividen entre sistemas de eje horizontal, de eje vertical y movimiento reciproco (París, 2013).

- Turbinas de eje horizontal

Las turbinas de eje horizontal aprovechan la energía cinética contenida en las corrientes marinas. Se pueden presentar variaciones de direcciones y fase en que se encuentren las mareas, lo que implica un menor factor de planta. Entre ellas podemos encontrar las siguientes:

- Mareogeneradores de eje Horizontal SeaGen

Consiste en un pilote el cual se funda en el fondo oceánico enterrando una parte de este (figura 1.6). En el pilote se montan unas vigas que salen en voladizo a cada lado, de los extremos de cada una de estas vigas hay una turbina, paralelas entre ellas, con un rotor de dos aspas. Estas vigas pueden deslizarse por el pilote hacia arriba y hacia abajo, en forma conjunta, con la posibilidad de sacar las turbinas sobre la superficie del mar para su mantención. Estas tienen un diámetro de rotor de 18m, una potencia de diseño de 2,5MW con una velocidad de diseño de 3m/s y una velocidad de conexión de 0,7 m/s. Además de una profundidad del mar menor que 50m.

El prototipo comercial que se construyó generará a frecuencia variable con corriente alterna con un voltaje nominal de 600V y del transformador va a salir en 11kV a 50Hz en 3 fases en forma sincrónica con el interconectado.

La turbina es simple, cuenta con dos palas, las que pueden rotar en 180° para una mayor eficiencia al funcionar con las corrientes en ambos sentidos. Además, según ha mostrado la experiencia con los aerogeneradores, este es uno de los más simples, y eficientes sistemas para extraer energía cinética de un flujo.

Se espera que no se requiera más que una inspección anual, donde se hagan pruebas de diagnóstico, un lavado al rotor para quitar posibles elementos marinos que puedan adherirse a éste, y arreglar alguna falla que se haya detectado. Lo que

más daña a un SeaGen no son las grandes tormentas, sino las olas de tamaño medio, las que son mucho más frecuentes y tienden a fatigar el material (KUNZE, 2008).



Figura 1.6 Mareogenerador de eje Horizontal Sea Gen

Fuente: (KUNZE, 2008)

- Mareogeneradores de eje Horizontal Verdant Power

La turbina de Verdant Power consiste en una hélice de tres palas, con un diseño patentado de las palas para obtener una gran eficiencia en un amplio rango de velocidades de corriente (figura 1.7). Lo que caracteriza esta turbina es que funciona completamente bajo el agua haciéndolas invisibles sobre el agua. El pilote que sostiene la turbina está hecho de manera tal que puede girar la turbina para seguir la dirección de la corriente de marea, hacia el flujo y el reflujo.

El diámetro del rotor es de 5m y tiene un empuje diseñado para unir las palas fuertemente y en forma rápida y que puedan ser intercambiables, la potencia de diseño 35,9kW con una velocidad de diseño de 2,2 m/s, pero modificable según el proyecto y una velocidad de conexión de 0,7m/s, además de una profundidad del mar menor que 9m. La conexión a la transmisión es opcional, la salida es en 3 fases y no necesita ser sincronizado a la red eléctrica.

El generador es sumergible, al igual que la caja de engranajes. La eficiencia de la caja de engranajes es de un 86%.

Se espera que se requiera una inspección cada dos años. Además, cada 10 años se espera hacer una mantención profunda. Para el mantenimiento se sacan las turbinas del mar, para lo cual cuentan con un sistema para sacarlo y ponerlo en forma fácil y rápida las turbinas. Al ser estas modulares, se pueden reacondicionar, mejorar, y cambiar piezas. Por lo tanto, se considera que tienen una vida útil indefinida. (Energía de las corrientes marinas, 2016)



Figura 1.7 Mareogenerador de eje Horizontal Verdant Power
Fuente (Energía de las corrientes marinas, 2016)

– Mareogeneradores de eje Horizontal Open Hydro

La turbina Open Hydro consiste en un rotor móvil con centro abierto, y con un anillo en el borde que va fija. En este anillo se encuentra el estator y el generador (figura 1.8)

Esta turbina no requiere caja de engranajes, utilizando un generador encapsulado en el borde de la turbina como un anillo fijo, entonces la única pieza que se mueve es el rotor. No tiene sellos. Funciona para flujos en ambas direcciones. El diámetro del rotor son dos turbinas idénticas de 15 metros de diámetro cada una, con un área de barrido del rotor de 313.8m² (se debe descontar el centro abierto) pero se pueden pedir a distintas escalas, la potencia de diseño es de 1520 kW con una velocidad de diseño de 2,57m/s y una velocidad de conexión de 0,7m/s.

La conexión a la transmisión es opcional. La salida es en 3 fases a 50 o 60 Hz según los requerimientos del país, y puede salir a 11 kV. La instalación consiste en

columnas montadas sobre una base de acero apoyada en forma gravitacional sobre el fondo marino.

Generador: es un generador de multi polos, magnético permanente, y en forma de anillo rodeando el rotor. La eficiencia de este generador se obtuvo de las pruebas hechas y es de un 97% (Energía de las corrientes marinas, 2016).



Figura 1.8 Mareogenerador de eje Horizontal Open Hydro

Fuente: (Energía de las corrientes marinas, 2016)

– Mareogeneradores de eje Horizontal Lunar Tidal Turbine (LTT)

Consiste en una turbina de eje horizontal ubicada dentro de un tubo simétrico (figura 1.9). El tubo tiene forma de un tubo Venturi, provocando una aceleración del flujo en ese lugar, y ordenando la dirección del flujo, aumentando así la eficiencia de la turbina. Tiene palas regulables, y una caja de engranajes mecánica. La turbina es removible sin la necesidad de sacar el tubo de Venturi. El prototipo está diseñado para producir 1 MW mientras el modelo comercial (LTT 2000) está diseñado para 2 MW con 3,1m/s de velocidad de corriente.

El diámetro del tubo es de 25m, el del buje es 3,9m, largo de las palas 7,8m con una Potencia de Diseño de 2 MW con una velocidad de diseño de 3,1m/s y una Velocidad de Conexión: 1m/s. La conexión a la transmisión es opcional. La salida es en 3 fases a 50 o 60 Hz según los requerimientos del país, y puede salir a 11 kV.

Existen dos posibles procedimientos de instalación, el primero es hacer todo afuera e introducir todo el sistema como un solo módulo muy pesado, y la otra posibilidad es instalar la fundación principal y luego el resto sobre ésta. El segundo procedimiento es más barato, pero requiere mayor tiempo en la instalación.

Si bien las corrientes de mareas tienen direcciones poco variables en lugares más abiertos, esta dirección puede llegar a variar entre el flujo y el reflujo hasta en 45° , para esto las turbinas pueden tener un control de direcciones. El proceso de generación de energía consiste en que la turbina hace funcionar una bomba hidráulica (disponible en el mercado). La bomba, utilizando aceites hidráulicos benignos para el medio ambiente, entrega aceite con alta presión a un motor hidráulico, y el motor hidráulico provoca que el generador eléctrico (disponible en el mercado) produzca electricidad.

Se estima que cada 4 años se remueva la turbina para una mantención. Además, se cuenta con un sistema de control que tiene la facultad de diagnosticar el 99,9% de las posibles fallas del sistema (Lunar Energy, 2016).

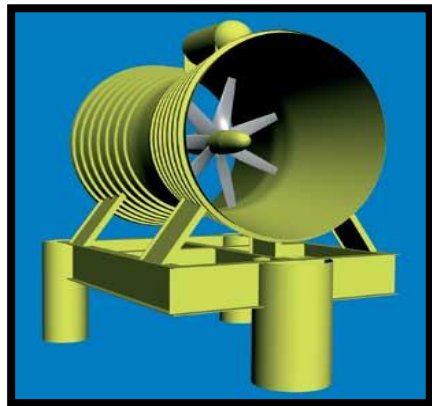


Figura 1.9 Mareogeneradores de eje Horizontal Lunar Tidal Turbine

Fuente: (Lunar Energy, 2016)

– Mareogeneradores de eje Horizontal TideI

Consiste en dos turbinas de eje horizontal unidas entre ellas, de 500 kW cada una (figura 1.10). Estas turbinas están flotando, amarradas con cadenas al fondo del

mar, y cambian de posición con los cambios de dirección y sentido de las corrientes. Debido a su sistema de fundaciones, estas turbinas se pueden instalar en aguas profundas sin un aumento significativo de costos.

Las palas son fijas y de 8 metros de largo. El diámetro del rotor es de 18,5m, la potencia de diseño 1 MW con una velocidad de diseño de 2,3m/s y una velocidad de Conexión 0,7m/s. La conexión a la transmisión es opcional. La salida es en 3 fases a 50 o 60 Hz según los requerimientos del país, y puede salir a 11 kV.

No utiliza fundaciones, lo que utiliza es un sistema de amarras que pueden ser con cadenas o cables de acero y anclas que pueden ser bloques de hormigón que funcionan gravitacionalmente. Idealmente consiste en 2 anclas alineadas en la dirección de las corrientes prevalecientes en el lugar y 5 cables, pero esta configuración puede variar de acuerdo con las condiciones del fondo marino (Energía de las corrientes marinas, 2016).



Figura 1.10 Mareogeneradores de eje Horizontal TidEl

Fuente: (Energía de las corrientes marinas, 2016)

– Gulf Stream turbines

Esta turbina es un concepto único para una central eléctrica sumergible autosuficiente que opera con seguridad cerca de la superficie (figura 1.11). Las turbulencias superficiales son neutralizadas por el par de turbinas y generadores que giran en direcciones opuestas que se encuentran bajos y a cada lado de un

tanque de flotación en forma de torpedo que se extiende de proa a popa. Gracias al flotador y al peso de los generadores su centro de flotabilidad se encuentra por encima de su centro de gravedad lo que evita además que este se vuelque. Potencia aproximada entre 600 y 1.000 kW por rotor dependiendo de su diámetro (THE GULF STREAM TURBINE, 2016).



Figura 1.11 Gulf Stream turbines

Fuente: (THE GULF STREAM TURBINE, 2016)

– SMD Hydrovision

Este sistema consiste en dos rotores de ejes horizontales que giran en sentido contrario, unidos por una viga transversal con turbinas de 500 kW cada uno (figura 1.12). El sistema de amarre permite que las turbinas se alineen en el sentido del flujo de corriente sin requerir ninguna intervención externa. Cada aspa es de 8 m, y el rotor posee un diámetro de 18,5 m. Estas unidades de 1 MW están diseñadas para ser montadas en un entorno de corriente de marea alta, con una velocidad de nueve nudos o más, en una profundidad de agua de más de 30 m. La potencia aproximada es 1 MW a 2,3 m/s (Subsea oil y gas directory, 2016).

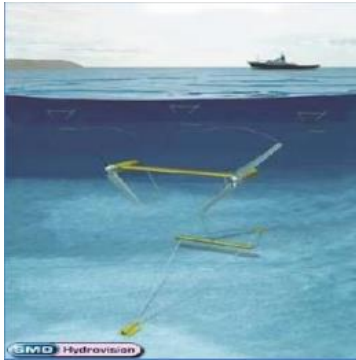


Figura 1.12 SMD Hydrovision
(Fuente: (Subsea oil y gas directory, 2016))

- Turbinas de eje vertical

Las turbinas de eje vertical generalmente tienen dos o tres hojas montadas a lo largo de un eje vertical para formar un rotor. El movimiento cinético de la corriente de agua crea un empuje en las hojas haciendo que el rotor gire impulsando un generador eléctrico. Entre ellas podemos encontrar las siguientes:

- Mareogeneradores de eje Vertical Turbina Helicoidal Gorlov (GHT)

Esta turbina es de eje vertical, de flujo cruzado y tiene palas con forma de ala de avión (figura 1.13). Debido su forma simétrica, mismo sentido, independientemente del sentido y dirección esta turbina gira siempre en el de la corriente. La turbina GHT puede ser instalada en zonas muy poco profundas, tanto como 3 metros de profundidad, y además permite que se instalen varias en un mismo lugar, tanto una al lado de la otra como un delante de la otra, teniendo así la capacidad de ampliar la planta sin grandes modificaciones al proyecto.

El diámetro de rotor es de 1m, la altura de 2,5 m, la potencia de diseño igual a 1,5 kW con una velocidad de 1,5 m/s, y de 180 kW con una velocidad de 7,72 m/s. La turbina se diseña para una velocidad de 7,72 m/s con una potencia de 180 kW y una velocidad de conexión de 0,5m/s (no se recomiendan para velocidades menores a 1,5m/s).

La conexión a la transmisión es opcional, y la salida se realiza en tres fases a 50 o 60 Hz según los requerimientos del país, y se puede generar en la salida 11 kV. La turbina es de eje vertical, con 3 palas de aluminio con forma aerodinámica, y un área frontal de $2,5\text{m}^2$. Las palas se inclinan 67° a partir del eje, y se instalan a un marco, el cual se ancla al fondo marino.

La eficiencia del generador se obtuvo en base a distintas pruebas y es de un 80%, pero se pueden utilizar distintos generadores con distintas eficiencias según el rango de velocidades existentes en el sitio de instalación (Energía de las corrientes marinas, 2016).



Figura 1.13 Mareogeneradores de eje Vertical Turbina Helicoidal Gorlov

Fuente: (Energía de las corrientes marinas, 2016)

– La turbina KOBOLD

Consiste en una estructura flotante que posee, en su parte inferior, una turbina de eje vertical o rotor de 6,0 m de diámetro, con hojas de 5,0 m de altura (figura 1.14). La potencia se calcula multiplicando el torque en el eje de la turbina por la velocidad angular. La planta piloto se opera desde el 2001 y hasta ahora se considera satisfactoria. La potencia de diseño es de 80 kW (Ganzirri, il Peloro e lo Stretto di Messina, 2016).

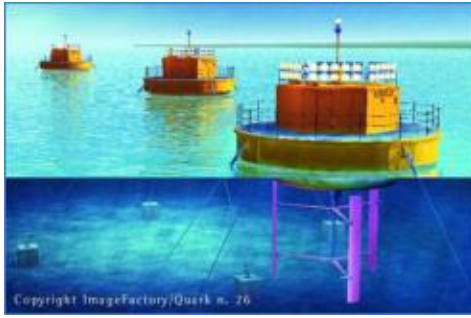


Figura 1.14 Turbina KOBOLD

Fuente: (Ganzirri, il Peloro e lo Stretto di Messina, 2016)

– SeaPower Inc. (vertical axis)

Tidal Turbine Power Plant (TTPP) por SeaPower se basa en la turbina de Savonius, y originalmente se diseña para la conversión de energía cinética de las corrientes oceánicas en energía rotatoria (figura 1.15). Este tipo de turbina de eje vertical es relativamente lento, pero genera un alto torque. La potencia es de 60 kW aproximada (SeaPower, 2016).

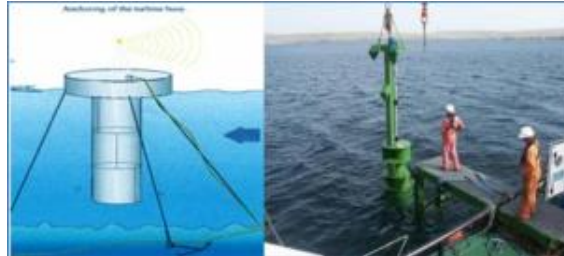


Figura 1.15 SeaPower Inc. (vertical axis)

Fuente: (SeaPower, 2016)

– Turbinas de movimiento reciproco

El fluido al pasar por el dispositivo ejerce una fuerza que mueve un alabe de un lado a otro, movimiento que acciona un dispositivo de transformación como un pistón neumático o una bomba hidráulica. Permite impulsar una turbina y generar electricidad.

– Generador Stingray

En UK se instala en el 2002 por parte de Engineering Bussines Ltd., el prototipo denominado Stingray, de 150 kW con corrientes de 2 m/s, en Yell Sound cerca de las islas Shetland (Escocia) (figura 1.16). Se trata de una especie de ala de avión submarina horizontal que oscila con las corrientes marinas y varía su ángulo de inclinación para obtener un movimiento ascendente y descendente para generar electricidad. Tiene aproximadamente 20 m de ancho y 24 m de alto, montado sobre un brazo horizontal.

Las corrientes mueven el ala montada sobre el brazo de arriba abajo, accionando unos cilindros hidráulicos de aceite a presión que se dirigen a un motor hidráulico conectado a un generador eléctrico. La salida de este generador pasa a un sistema de control industrial dando lugar a corriente continua, que viaja por un cable submarino hasta una planta en la costa donde se obtiene corriente alterna (Energía de las corrientes marinas, 2016).



Figura 1.16 Parque Stingray

Fuente: (Energía de las corrientes marinas, 2016)

– Proyecto Sea Snail

Es un prototipo de 22 Tm capaz de generar 150 kW de energía eléctrica, desarrollado por la Universidad Robert Gordon, en Aberdeen Escocia, e instalado en las Islas Orkney, lleva una pequeña turbina que genera electricidad sobre el fondo del mar (figura 1.17).

Su armazón tubular, de acero, se clava sobre el fondo del océano. La turbina situada en el centro se encuentra rodeada por una serie de lóbulos en forma de ala que crean una fuerza descendente conforme la corriente pasa encima de ellos. Contra más rápido sea el flujo de corriente, más fuertemente son empujados hacia el lecho marino. Las alas tienen un movimiento oscilatorio de acuerdo con la marea; en este prototipo están fabricadas con fibra de vidrio, pero en el futuro se rediseñarán empleando una cubierta inoxidable.

Para su mantenimiento, Sea Snail está diseñado para ser izado a la superficie, donde se evitan los peligros de las fuertes corrientes. Como la estructura está sumergida, no alteran el paisaje, ni contaminan o provocan cualquier daño ambiental significativo (Energía de las corrientes marinas, 2016).



Figura 1.17 Prototipo Sea Snail

Fuente: (Energía de las corrientes marinas, 2016)

– Sistema VIVACE

En un sistema VIVACE (figura 1.18) , la corriente de agua atraviesa los espacios entre los cilindros horizontales. La turbulencia generada por el movimiento de los cilindros produce un vórtice que les infiere un movimiento mecánico vertical, a lo largo de las guías ubicadas en los soportes verticales. Unos generadores ubicados en estos soportes, producen energía a partir del movimiento de los cilindros.

El vórtice inducido por las vibraciones tiene la forma de ondulaciones redondeadas. La presencia de un cilindro forma ondas, cuya velocidad es igual o mayor a la velocidad de la corriente. Esto hace que los remolinos formen un patrón en los lados

opuestos del cilindro. Los vórtices empujan y mueven al objeto hacia arriba y hacia abajo, o hacia la izquierda y hacia la derecha, siempre perpendicular a la corriente (Flores, 2013).

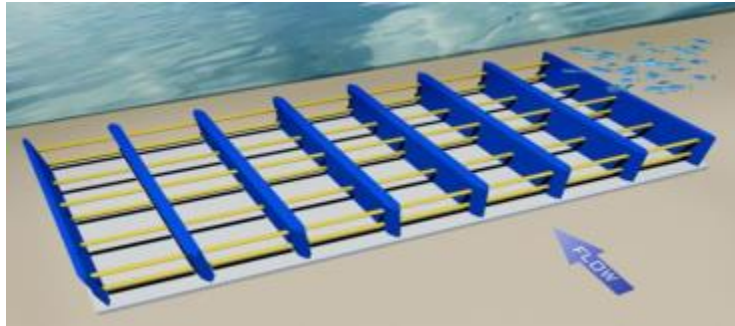


Figura 1.18 Sistema VIVACE

Fuente: (Flores, 2013)

1.5 Experiencias del empleo de la energía mareomotriz en el mundo

- Planta de energía mareomotriz Annapolis Royal, Canadá

La planta de energía mareomotriz Annapolis Royal se ubica en la Cuenca de Annapolis, en la Bahía de Fundy en Canadá. Cuenta con una capacidad instalada de 20 MW posicionándose como la tercera planta de energía mareomotriz más grande del mundo actualmente en servicio. Genera 50 GWh de electricidad al año, y cubre las necesidades de energía de unos 4.000 hogares.

La planta, se opera por Nova Scotia Power, y entra en funcionamiento en 1984, después de cuatro años de construcción. La central consta de turbinas de cuatro palas y compuertas de esclusa. Las compuertas permanecen cerradas con las mareas entrantes para crear un estanque en la parte baja del río Annapolis. Cuando las compuertas se abren el agua se desplaza hacia el mar y se impulsa la turbina para generar energía, siempre que la diferencia de altura se sitúe en 1,6 m o más entre el estanque y el mar con la bajada de la marea (ver anexo4) (Rodríguez, En construcción -Energía y Electrónica, 2014).

- La Rance en Francia

La planta de energía mareomotriz de La Rance de 240 MW situada en el estuario del río Rance, en Bretaña, Francia, funciona desde el año 1966, por tanto, es la estación de energía mareomotriz más antigua y la segunda más grande del mundo. La planta de energía renovable, actualmente se opera por Electricité de France (EDF), y tiene una capacidad de generación anual de 540 GWh.

La planta de energía mareomotriz de La Rance, se llevó a cabo entre 1961 y 1966. Consistió en la construcción de una presa de 145,1 m de longitud con seis compuertas de ruedas fijas y un dique de 163,6 m de largo. Siendo el área de la cuenca abarcada por la planta de 22,2 km². El lugar donde se sitúa las instalaciones cuenta con un rango de marea media de 8,2 m, el más alto de Francia, lo que permite producir energía a través de 24 turbinas de bulbos reversibles con una potencia nominal de 10 MW cada una. La electricidad producida se envía a la red nacional de transmisión de 225kV, cubriendo las necesidades de aproximadamente 130.000 hogares cada año (Rodríguez, En construcción -Energía y Electrónica, 2014).

- Kvalsund. Noruega

En el estrecho de Kvalsund. Noruega se encuentra instalado un parque submarino de turbogeneradores eléctricos, similares a los eólicos en su diseño, movidos por turbinas. Tiene 400 m de ancho, la velocidad promedio es de 1,8 m/s (4,07 nudos) y llega hasta 2,5 m/s (5,66 nudos), la profundidad máxima es de 50 m, tiene un tráfico marítimo considerable y es cruce habitual de muchas especies de peces y mamíferos como las orcas y las ballenas. Posee 20 generadores de 200 kW ubicados a 17 m de profundidad, a 80 m de la costa al oeste del puente y suministran la energía que consume el municipio Kvalsund en el condado de Finnmark con 1091 habitantes y un consumo anual de 21 GW año (Canavaciolo, 2007).

- Planta de Energía Mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur

Con una capacidad de producción eléctrica de 254 MW, la planta de energía mareomotriz Sihwa Lake se localiza en el Lago Sihwa a unos 4 km de la ciudad de Siheung, en la provincia de Gyeonggi de Corea del Sur. Es la planta de energía mareomotriz más grande del mundo. El proyecto, propiedad de la Corporación de Recursos Hídricos de Corea, se inauguró en agosto de 2011 contando con un malecón de 12,5 kilómetros de longitud construido en 1994, con el objetivo de prevenir inundaciones y para cumplir con propósitos agrícolas.

La energía de la planta se genera en las entradas de marea en la cuenca de 30 km² con la ayuda de 10 turbinas de bulbo sumergidas de 25,4 MW, se utilizan ocho tipos de compuertas de esclusa para la salida de agua desde el dique. El proyecto de energía mareomotriz se construyó entre 2003 y 2010 con un presupuesto de 256,8 millones de euros, siendo la compañía Daewoo Engineering & Construction la responsable de la ingeniería, suministro y construcción (EPC). En la actualidad, la capacidad de generación anual de las instalaciones se sitúa en los 552,7 GWh (ver anexo 5) (Rodríguez, En construcción -Energía y Electrónica, 2014).

1.6 Conclusiones del capítulo

- En el transcurso de la investigación se pudieron establecer los fundamentos teóricos que sustentan el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica.
- La apreciación de los antecedentes históricos del proceso de generación de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz permitió definir los componentes más notables en el desarrollo de su utilización como recurso energético renovable.

CAPITULO-II:
POTENCIALIDADES DE LA ENERGÍA
MAREOMOTRIZ PARA LA OBTENCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MUNICIPIO GIBARA

Introducción al capítulo:

En este capítulo se determinan las potencialidades que presenta el empleo de la energía mareomotriz o de las mareas como fuente para la obtención de energía eléctrica en el municipio de Gibara, así como el mecanismo que más se ajusta a las características físico - geográficas de sus costas.

2.1 Estado actual del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara

La energía mareomotriz presenta grandes ventajas en cuanto a impacto ambiental, ya que es una fuente limpia e inagotable de energía, de gran abundancia y potencial. A pesar de esto en Cuba y específicamente en el municipio de Gibara de la provincia de Holguín, no se aplican los métodos para utilizar esta energía para la generación de electricidad. Para reconocer las principales causas de este problema, el estado en que se encuentran las investigaciones y estudios realizados sobre las mareas, se efectuaron varias actividades.

Las principales acciones que se orientaron para determinar la situación actual de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara, además de las consultas bibliográficas fue el análisis documental obteniéndose los siguientes resultados.

- **Resultado**

Las mediciones directas del nivel del mar constituyen la principal fuente de información para la caracterización de la variabilidad estacional del nivel del mar (IOC, 2006). En el caso de Cuba, los registros mareográficos disponibles en el país desde 1966, permiten realizar una caracterización de la misma.

El Instituto de Oceanología en conjunto con Geocuba Geodesia, realizaron el estudio “Variabilidad estacional del nivel del mar en el Archipiélago cubano”, con el objetivo de caracterizar la variabilidad estacional del nivel del mar a partir de series de alturas horarias del nivel del mar, de uno a 40 años de longitud. Como información primaria se utilizaron las series de alturas horarias del nivel del mar de 14 registros mareográficos cubanos, obtenidos por la Red Mareográfica Nacional,

perteneciente a Geocuba Geodesia, mediante mareógrafos de flotador y contrapeso, desde 1966 hasta el 2008 (figura 2.1).

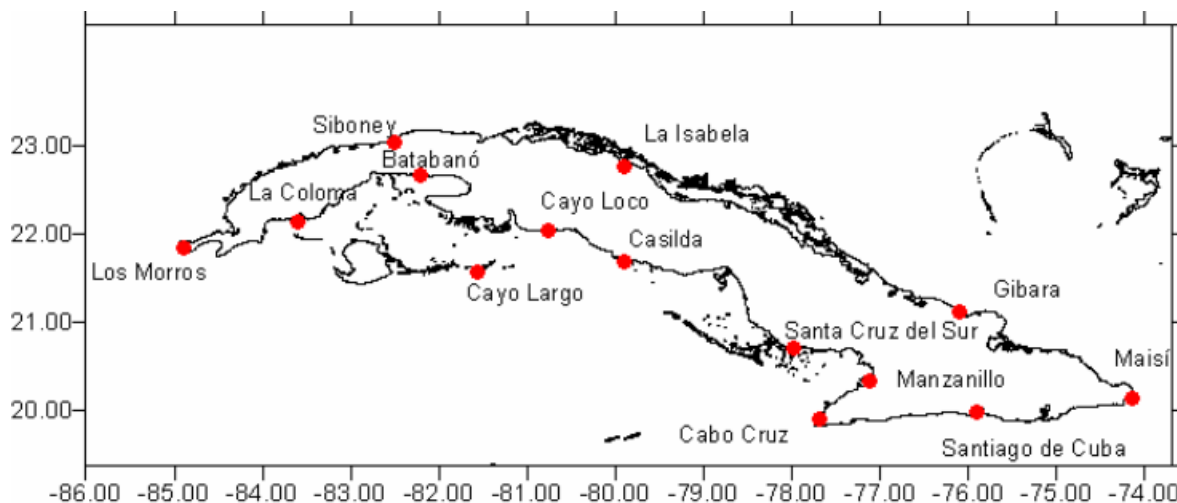


Figura 2.1. Distribución geográfica de las estaciones de la Red Mareográfica Nacional. Fuente: (González, 2009)

A estos registros se les aplica sistemáticamente un procesamiento regido por normas metodológicas y de control de calidad (Geocuba Geodesia, 2004), que se toman en consideración con las normas y avances tecnológicos internacionales de medición y procesamiento de los datos mareográficos (IOC, 2006). Los datos de las alturas horarias, ver (tabla 2.1), se refirieron al cero geodésico mediante la sustracción del cero del puesto (González, 2009).

Tabla 2.1. Principales características de los registros mareográficos

Estación Mareográfica	Duración de los registros				Latitud (N)	Longitud (W)
	Desde	Hasta	Años	Cero		
Los Morros	1973	2000	28	-38	21°54.0´	84°54.4´
Siboney	1966	2005	40	-53	23°05.6´	82°28.2´
La Isabela	1973	2008	36	-62	22°56.4	80°00.8
Gibara	1976	2008	33	-92	21°06.5	76°07.5
Maisí	1995	2001	4	-135	20°14.8	74°08.7
Santiago de Cuba	1993	2008	12	-153	19°59.1	75°52.5

Cabo Cruz	1993	2008	14	-88	19°50.4	77°43.7
Manzanillo	1993	2008	11	-128	20°20.4	77°08.8
Santa Cruz del Sur	1994	2001	7	-88	20°42.0	77°58.6
Casilda	1972	1995	24	-95	21°45.2	79°59.5
Cayo Loco	1992	2008	15	-155	22°09.1	80°27.3
Cayo Largo	1983		1	-126	21°37.3	81°33.9
Batabanó	1991		1	-68	22°40.5	82°17.5
La Coloma	1991	2001	11	-100	22°14.2	83°34.3

Fuente: (González, 2009)

En la costa N se producen amplitudes de marea superiores a las de la costa S. Las mayores amplitudes de marea en la isla se registran en el tramo costero de Isabela de Sagua a Baracoa, donde en ocasiones alcanza los 1,20 m. En el Golfo de Batabanó se observa una notable influencia del viento, que se incrementa hacia la costa, de forma que en la zona de Surgidero de Batabanó aparece definida la curva de marea solo en los períodos de calma.

Alrededor de nuestras costas las principales características de las corrientes oceánicas son las siguientes (Montesinos, 2012):

- Región Noroccidental: Las velocidades máximas de las corrientes alcanzan los 140 cm/s durante el mes de septiembre y 100 cm/s en los meses de diciembre febrero y junio. El valor máximo de velocidad que se ha reportado ha sido de 200 cm/s y fue muestreado en el mes de junio de 1997.
- Canal de San Nicolás y Canal Viejo de las Bahamas: Se generan contracorrientes costeras con velocidades de 50 cm/s en el otoño.
- Región Nororiental: En la capa superficial las corrientes más intensas se registraron entre la Bahía de Nuevitas y Puerto Padre, alcanzando velocidades entre 55-95 cm/s en la época de invierno y en el otoño. Al N de

Moa, en el verano y la primavera las velocidades no son superiores a un nudo (50 cm/s). En el Paso de los Vientos las velocidades máximas fueron de 50 cm/s.

- Región Suroriental: Durante el verano las velocidades se aproximan a 1 nudo (50 cm/s).
- Región Sur central: Durante la primavera al S del Golfo de Ana María las velocidades no superan los 50 cm/s. En el otoño, se destacan velocidades de corrientes máximas de 100 cm/s. Entre el S de Cayo Guano del Este y el S de Trinidad, hay velocidades inferiores a 1 nudo (50 cm/s).
- Región Suroccidental: Las velocidades de las corrientes en la costa S generalmente no exceden de 1 nudo, aunque se observan valores superiores en algunas zonas próximas a las costas.

Corrientes marinas en la plataforma cubana. Algunos resultados obtenidos (Montesinos, 2012)

- Golfo de Batabanó: El patrón de circulación de las aguas del Golfo de Batabanó, se define por un movimiento general de las aguas de E a W, con una velocidad promedio del movimiento neto entre los 0 – 10,7 cm/s, con corrientes de marea semidiurnas de moderada intensidad, (velocidad media de 10 – 20 cm/s) en los canales entre los cayos de la periferia SE. Las corrientes de marea más intensas, (inferiores a 60,0 cm/s), se observaron en los canales delimitados por los cayos Cantiles, Rosario y Cayo Largo, en la porción E del Archipiélago de Los Canarreos. Golfos de Ana María y Guacanayabo. Las mediciones de corrientes en estaciones diseminadas por todo el Golfo de Ana María y en 7 localidades del Golfo de Guacanayabo, permiten aseverar, que el movimiento a largo plazo de las aguas en estos golfos, es en dirección W. En todo el interior de estas áreas de la plataforma, tienen lugar débiles corrientes de marea semidiurnas, con velocidades medias entre 2,0 y 10,0 cm/s, que se refuerzan en los canales y pasas entre cayos, alcanzando los 100,0 cm/s en el canal de Bretón, Golfo de Ana María.

- Archipiélago de Los Colorados: En el Archipiélago de Los Colorados, la marea es mixta, semidiurnas irregular, con dos pleamares y dos bajamares de diferente amplitud en un día y las corrientes tienen un patrón de comportamiento básicamente diurno. En general, las corrientes de mareas son débiles, inferiores como promedio a los 10cm/s, con máximas en los canales entre cayos, inferiores a los 90cm/s.
- Archipiélago de Sabana – Camagüey: En los canales y canalizos de la barrera exterior de la cayería, (antes de la construcción de los pedraplenes), se observan corrientes reversivas de marea intensas, sobre todo, en el canal de Nuevitas (V máx. 116 - 162 cm/s) y en el canal de Antón (V máx. 120 cm/s). Actúan con un semiperíodo de marea semidiurnas (6 horas como promedio, aunque el vaciante dura 1-2 h más que el llenante) y en dos direcciones opuestas, coincidentes con la orientación del eje del canal. El porcentaje de calmas es por lo general inferior al 10%.

Las corrientes marinas en las aguas de la plataforma cubana se han estudiado con mayor o menor grado de profundidad, en dependencia de la importancia económica relativa de cada sector de plataforma. Existen varios lugares que son potencialmente altos, debido a que las velocidades de la corriente sobrepasan 50 cm/s y son idóneos para utilizarse con estos fines.

Según estudios realizados existen 6 localidades con potencialidad según las velocidades de las corrientes marinas de nivel 1. En ellas las corrientes de marea presentan una velocidad media superior a los 50 cm/s, máximas superiores a los 100 cm/s y calmas inferiores al 5%:

- Canal de Paso Malo, en el área de la compuerta de la dársena
- Canal de Los Barcos. (Puente en el pedraplén Caibarién – cayo Santa María)
- Canales en los puentes del pedraplén Turiguanó - cayo Coco
- Canal Pancho la vega, al N de bahía de Perros
- Tornos del canal de la bahía de Nuevitas

- Canal de entrada de bahía de Banes

Particularmente, en la provincia de Holguín, se han realizado disímiles estudios en las costas de Gibara relacionados con las precipitaciones costeras. Entre los que se encuentra “Particularidades hidrometeorológicas del litoral Gibara - Playa Guardalavaca” (Mayo, 2016) y “Tendencias climáticas de las inundaciones costeras en el litoral Gibara-Playa Guardalavaca, provincia Holguín, Cuba” (Mayo 2016) ejecutados por el Centro Meteorológico Provincial (CMP). Estas investigaciones tienen el objetivo de mostrar las tendencias climáticas de las inundaciones costeras, sin tener en cuenta las potencialidades del mar como fuente de extracción de energía. A pesar de estas investigaciones realizadas aún se desconocen las potencialidades como fuente para la generación de energía eléctrica en la zona.

2.2 Criterios generales a tener en cuenta para la aplicación de los métodos de generación de energía eléctrica

Los factores primordiales para el aprovechamiento de la energía mareomotriz en un emplazamiento son:

- la amplitud de la marea (superior a los 5 m)
- las características topográficas adecuadas del litoral que satisfagan que con una reducida obra civil se pueda encerrar el máximo volumen de agua durante la marea alta dentro del estuario

Centrándose en los generadores por rotores, la energía extraíble depende de dos parámetros:

- Diámetro del rotor de la turbina.
- Velocidad de la corriente: El valor de la velocidad del agua más apropiado para el diseño se estima entre 2 y 3 m/s.

2.2.1 Características principales de la zona de estudio

La Bahía de Gibara (figura 2.2) tiene la forma irregular de una bolsa cuya boca, de unas 900 brazas de anchura, mira hacia el Norte, su ancho máximo es de 2.700 brazas. En el centro de la bahía se encuentra un canal con una profundidad de 14 pies. Es el puerto de más fácil entrada y salida de toda la costa norte de la provincia oriental. (Wikipedia, 2016)

La bahía se encuentra en la región nororiental del país, donde según los estudios realizados (Montesinos, 2012) las características de las corrientes marinas tienen valores entre los 0.5 m/s y 1 m/s aproximadamente.

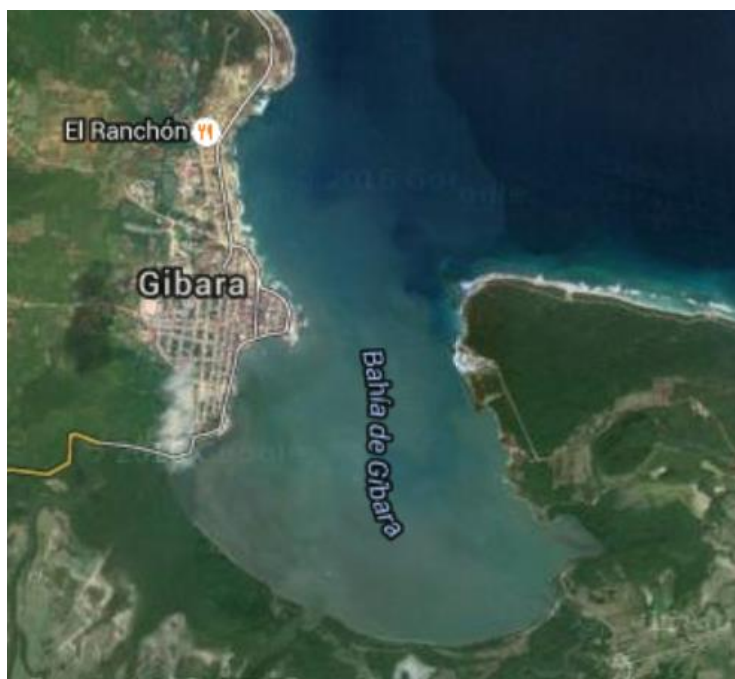


Figura 2.2 Bahía de Gibara
Fuente: <https://www.google.com.cu/maps/>

2.3 Selección del método de generación

Es necesario señalar, que la amplitud de las mareas en las costas cubanas es una limitante para la implementación de centrales mareomotrices, pues las mayores amplitudes tienen lugar en el tramo costero de Isabela de Sagua a Baracoa, donde en ocasiones alcanza los 1,20 m, con promedios de 0,70 m.

- Aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas.

La energía de las corrientes marinas tiene un potencial aprovechable mayor de 30 GW, y presenta una mayor densidad energética que la energía eólica como se muestra a continuación:

Viento: 15 m/s \Rightarrow 2 kW/m²

Corrientes marinas: 2 m/ s \Rightarrow 4 kW/m²

Corrientes marinas: 3 m/ s \Rightarrow 14 kW/m²

Como el agua marina es 832 veces más densa que el viento, la corriente de marea puede proporcionar niveles útiles de energía de velocidades mucho más bajas. Por ejemplo, el flujo de un agua de 1 m/s (aproximadamente 2 nudos) porta la misma densidad de energía cinética que un viento soplando a 9 m/s (8 nudos) (Fraenkel, 1999, citado por Ball, 2002). Esta energía cinética puede ser convertida en electricidad, con una eficiencia relativamente alta, usando turbinas submarinas (o grupos de turbinas) desplegadas lateralmente a través del flujo en los lugares con corrientes fuertes.

Para estos propósitos, el requerimiento necesario más probable para una operación económica y práctica, es la existencia de una localidad donde el pico principal de la velocidad de las mareas vivas esté en el rango de 2-3 m/s (de 4-6 nudos). (Fraenkel, 1999; Osborne, 2000; ITPower website, citado por Ball, 2002) Es conveniente señalar, que una velocidad de corriente marina de 1 nudo (1,852 km/h) es equivalente en términos de energía eólica a un viento 49 km/h.

Cualquier dispositivo con el objetivo de aprovechar la energía limpia y renovable abundante del océano y otros recursos hídricos deben tener alta densidad de energía, ser discretos, tener bajo mantenimiento, tener madurez tecnológica, cumplir con los objetivos de costes de ciclo de vida, y tener una vida de 10-20 años.

Los datos antes expuestos permiten escoger los generadores de corrientes de mareas como método a usar para la generación de electricidad a partir de la energía mareomotriz, pues las mareas presentes en las costas cubanas no exceden los 1.2

m. El lento movimiento de las corrientes oceánicas y fluviales puede convertirse en una fuente de energía fiable y asequible. Por lo que dentro de este método usaremos el sistema VIVACE como mareogenerador a estudiar, aplicado a las corrientes marinas de 0,5m y 1m.

- Sistema (VIVACE), por sus siglas Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy

Las corrientes oceánicas y fluviales del mundo transportan una cantidad enorme de energía cinética, pero la mayoría de esta agua fluye a menos de cuatro millas por hora. Las tecnologías actuales de turbinas y molinos de agua no pueden generar suficiente electricidad a esa velocidad como para transformar su uso en algo económicamente viable. Investigadores de la Universidad de Michigan, han superado esta limitación al aprovechar los vórtices cargados de energía que se forman cuando el agua fluye junto a un objetivo cilíndrico, aun a velocidades bajas. Se sabe que los salmones y las truchas aprovechan la fuerza creada naturalmente por los remolinos del agua para poder nadar contra la corriente.

Un dispositivo mecánico nuevo, es diseñado para aprovechar esa energía y convertirla en electricidad en forma económica, y transformar la energía hidroeléctrica en un componente mucho más grande de la mezcla de energía renovables del mundo. “Podremos usarlo allí donde haya corrientes”, dice Michel Bernitsas, un profesor del departamento de ingeniería marina en la Universidad de Michigan.

El dispositivo funciona con el principio conocido de vibraciones inducidas por vórtices. A medida que la corriente pasa junto al cilindro, una capa fina de agua se arrastra por cada lado de la superficie redondeada hasta que, en algún punto, detrás del objetivo, la capa de agua se separa de la superficie y se transforma en un vórtice. Parte del fenómeno, es que las separaciones del lado derecho e izquierdo no ocurren simultáneamente, y uno de los lados se retrasa.

El resultado es un patrón alternado de vórtices que pueden imponer una fuerza tremenda sobre estructuras bajo agua. Cuando un objeto de forma cilíndrica se desplaza más libremente en su entorno, como un señuelo de pesca arrastrado por la corriente de un río, los vórtices alternantes harán que el objeto vibre de izquierda a derecha. Bernitsas dice que los vórtices alternantes se “acoplan” con la frecuencia de oscilaciones del objeto. “El resultado final es que obtenemos una sincronización entre la alternancia de los vórtices y el movimiento del cilindro”.

El convertidor VIVACE (Vibraciones Inducidas por Vórtices para Energía Acuática Limpia), es un sistema modular que en el laboratorio genera 51 vatios por metro cúbico de agua que fluye a tres nudos, o alrededor de 3,5 millas por hora.

En su forma más primitiva, VIVACE es un cilindro horizontal sobre resortes que se desplaza hacia arriba y hacia abajo entre dos vías verticales mientras que el agua pasa a su lado. Esto crea energía mecánica que se transforma en electricidad. Bernitsas prevé que el sistema sea apilable y que se pueda utilizar con configuraciones y capacidades de generación distintas, desde kilovatios hasta varios megavatios, sin ocupar demasiado espacio ajustándose al entorno, donde un megavatio ocuparía alrededor de 90 pies cúbicos.

El movimiento lento de los cilindros hace que el sistema sea más seguro para los peces. Peter Fiske, vicepresidente de investigación y desarrollo en Pax Scientific (una empresa de ingeniería que se especializa en la dinámica de los fluidos), dice que las tecnologías convencionales de las turbinas de agua padecen el “efecto Cuisinart”: cortan a los peces en pedacitos. “Lo bueno del diseño de VIVACE es que solo se mece de atrás hacia adelante sin cortar nada en el agua”, comenta.

Bernitsas, fundó una empresa llamada Vortex Hydro Energy para comercializar su invento y está convencido de que VIVACE se podrá perfeccionar a un punto en que se pueda generar electricidad a 5,5 centavos por kilovatio-hora en proyectos de 10 megavatios o de mayor tamaño. Esto haría que VIVACE pueda competir con la creación de energía nuclear y combustibles fósiles.

Los módulos (figura 2.3) se fabricarían en unidades de 500 kilovatios. Bernitsas dice que existen muchas posibilidades para mejorar la eficiencia del sistema, y planea hacerlo aprendiendo de los peces y del modo en que sus escamas y aletas caudales pueden afectar la hidrodinámica. Las escamas, dependiendo de lo áspera que sean y de su ubicación, pueden amplificar la oscilación.



Figura 2.3 Modulo conversor VIVACE.

Fuente: Universidad de Michigan, 2008.

2.4 Evaluación de la potencia generada con el uso del sistema VIVACE en el municipio Gibara

Un convertidor VIVACE, que genera energía utilizable de las corrientes del océano o ríos, es modular, flexible y escalable. Así, puede ser diseñado, fabricado e instalado para generar electricidad en diversas aplicaciones. Estas tres palabras clave se definen a continuación.

- Modular.

Un convertidor de VIVACE es un conjunto de módulos VIVACE. Puede consistir en un único módulo con un diámetro de 2 cm y la longitud de 30 a 40 cm a miles de módulos con cilindros de 1 m de diámetro y 20 m en longitud.

- Flexible.

El convertidor de VIVACE es flexible pues puede ser diseñado para generar electricidad a partir de océano y corrientes de los ríos en una variedad de configuraciones, para una determinada salida de potencia. Las siguientes variables de diseño de un convertidor VIVACE y del cilindro oscilante VIVACE permiten una gran flexibilidad (ver Figura 2.4):

- número de cilindro
- densidad de cilindros en el espacio
- dimensiones de los cilindros (D y L)
- propiedades de la superficie del cilindro
 - ✓ rugosidad y estimuladores de turbulencia
 - ✓ la disposición relativa cilindro con respecto a la otra (t y p)
 - ✓ relación de disposición del cilindro con respecto al perfil de velocidad del agua
 - ✓ relación de ubicación del cilindro en el cuerpo de agua (d) de la que extraen la energía
 - ✓ la relación de masa oscilante cilindro m^*
 - ✓ el muelle de rigidez K, y de amortiguación útil para aprovechar energía

C harn.

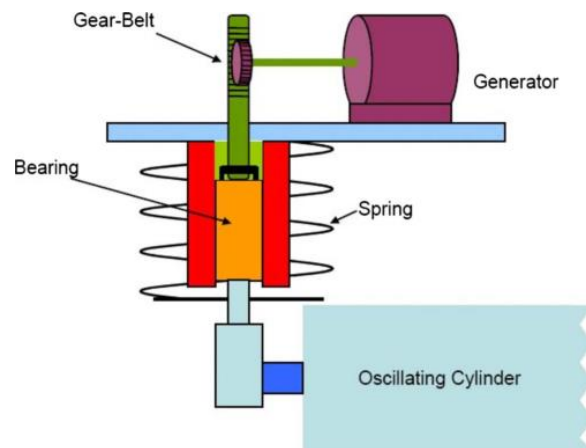


Figura 2.4: la resonancia no lineal ininterrumpida sin zonas muertas.

Fuente: (Bernitsas, 2008)

- Escalable.

El convertidor de VIVACE es escalable en el sentido que puede ser diseñado basado en los mismos principios presentados a través de módulos pequeños o grandes, como se explica más adelante.

La escalabilidad y flexibilidad del diseño de un convertidor VIVACE se basan en los siguientes cinco principios:

Principio 1: Vibraciones inducidas por vórtices (VIV) de cilindros circulares se produce prácticamente sobre toda la gama de número de Reynolds (Re). VIV no puede ocurrir en tres gamas de Re, que corresponden a las tres gamas de no emisión de vórtices en un flujo constante más allá de un cilindro estacionario. las zonas de prohibición de emisión de vórtices o zonas muertas son cuando:

- $Re < 40$ que corresponde a la gama de pre-vórtice

- $150 < Re < 400$ correspondiente a la transición de flujo laminar a turbulento en el interior de los vórtices de Karman

- $3 * 10^5 < Re < 5 * 10^5$ correspondiente a la región de transición de flujo laminar a turbulento

Estos rangos se obtienen experimentalmente y son válidos para cilindros lisos. Están afectados por varios factores tales como la condición de la superficie del cilindro, la vorticidad flujo ambiente, y condiciones del líquido que afectan a la viscosidad del agua como la salinidad y la temperatura. Algunos de estos factores pueden ser modificados en el estado de diseño o la operación de una manera pasiva o activa para asegurar que los cilindros VIVACE permanecen en VIV como se explica en el siguiente principio.

Principio 2: Las modificaciones en la geometría básica del cilindro oscilante de una manera pasiva o activa pueden ser diseñados y construido para asegurar que un cilindro VIVACE puede permanecer en VIV para todo el rango práctico de números de Reynolds. A continuación, se presenta una lista no exhaustiva de las técnicas

que se utilizan para implementar este principio para lograr escalabilidad y flexibilidad del convertidor VIVACE.

- Cambiar el diámetro de los cilindros y el número de Reynolds linealmente, proporcional con el diámetro. Este cambio es práctico sólo cuando pequeños cambios en Re son suficientes para mover un flujo de salida de una zona muerta.
- Introducir rugosidad de la superficie, lo que provoca un fuerte impacto en la ubicación de las zonas muertas en la escala de Re. La introducción de rugosidad de la superficie pasiva es muy eficaz cuando se conocen las condiciones de flujo entrantes.
- Introducir estimuladores de turbulencia fijos (pasivo), como la rugosidad de la superficie, y los estimuladores de turbulencia tienen un fuerte impacto en la ubicación de las zonas muertas en la escala de Re. Son muy eficaces cuando se conocen las condiciones de flujo entrantes y no cambian significativamente en el tiempo.
- Introducir controlables (activos) estimuladores de turbulencia. En el caso poco probable de fuerte variación del flujo entrante, la velocidad en el tiempo y el control activo a través de los estimuladores de turbulencia, sigue siendo el último recurso.

Principio 3: Para un número de Reynolds dado, un cilindro VIVACE puede estar en sincronización a través de amplios intervalos dependiendo de la masa oscilante, la masa de fluido desplazado, y la rigidez de los resortes de apoyo. El rango de sincronización puede ser muy largo para $m^* < 0,54$. Esto no da como resultado la amplitud máxima de oscilación, que a su vez contribuye al aumento de la generación de energía. El convertidor de VIVACE tiene como objetivo maximizar la energía obtenida en general mediante la identificación de una gama suficientemente amplia de la sincronización con una gran amplitud de oscilación suficientemente discutido en el Principio 4.

Principio 4: Para un número de Reynolds dado, m^* definido en el Principio 3 controla el rango de sincronización. La amplitud de las oscilaciones depende de m^* también.

Para maximizar la potencia aprovechada por el convertidor VIVACE, se controla las siguientes variables de diseño tanto pasiva como activa:

- el apoyo a la rigidez del resorte
- la masa oscilante de los apéndices del cilindro
- la amortiguación C_e inducida de nuevo en el sistema por el VIV
- la longitud de cada cilindro VIVACE tiene que ser lo suficientemente largo para asegurar una baja m^* pero no demasiado largo para dar lugar a la flexión modo excitación, lo que reducirá la correlación VIV longitud

Principio 5: La energía P_{VIV} , que un convertidor VIVACE puede extraer del flujo con una relación de conversión de potencia η_{VIVACE} , está dado por la siguiente ecuación:

$$P_{VIVACE-harn} = \eta_{VIVACE} \frac{1}{2} \rho_W U^3 D L \quad (\text{Ecu.2.1}) \quad (\text{Bernitsas, 2008})$$

Donde:

$P_{VIVACE-harn}$ = potencia de un convertidor

η_{VIVACE} = relación de conversión de potencia $\eta_{VIVACE} = 0,22$

ρ_W = densidad de agua de mar (kN/m^3)

U = velocidad de corriente marina (m/s)

D = diámetro del cilindro (m)

L = longitud del cilindro (m)

La modularidad, flexibilidad y la escalabilidad del convertidor de VIVACE lo hacen adecuado para una amplia variedad de aplicaciones. Se proporciona una lista no exhaustiva de las aplicaciones, clasificada en términos de escala de la energía eléctrica aprovechada. Este último es proporcional a las dimensiones generales del

convertidor a pesar de que las dimensiones de los cilindros VIVACE en VIV y sus posiciones relativas varían dramáticamente. Las potencias calculadas en los ejemplos a continuación se basan en:

- Velocidad de flujo $U = 0.5-1$ m/s
- Relación de conversión de potencia, $\eta_{\text{VIVACE}} = 0,22$, que es el valor eficaz medido en los ensayos con modelos de VIVACE.

Debería ser observado que este valor es conservador, ya que el sistema no ha sido optimizado de ninguna manera.

- El espacio entre los cilindros de $p = 8D$ y $t = 5D$.

Esto es mayor que el mínimo requerido de $4D$ para una interferencia mínima entre los cilindros estacionarios. También es significativamente mayor que las distancias de flujo de entrada y transversal de $2D$ y $1D$, respectivamente, para un cilindro en VIV aguas arriba de un cilindro fijo (Sumer 1997). Además, como se muestra en la (figura. 2.4), las filas de cilindros están escalonados en la dirección del flujo y alineadas en las otras dos direcciones.

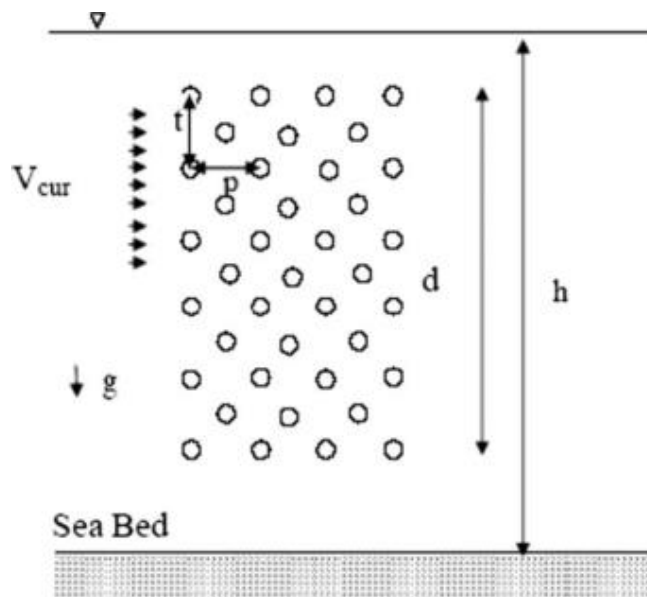


Figura 2.5: Geometría, dimensiones y disposición de los cilindros en un conjunto del convertidor VIVACE. Fuente: (Bernitsas, 2008)

Sobre la base de estos supuestos conservadores, las variables de diseño básicos de convertidores VIVACE para una potencia dada pueden ser calculada. Cabe señalar que existen infinitas soluciones para cada configuración de la planta de energía. Hemos seleccionado varias variables y, particularmente, D y L de tal manera que el número de cilindros no es excesivo.

Un mayor número de cilindros tendría como resultados mayor densidad de energía, pero aumentaría la complejidad. Además, se supone que un hogar típico cubano utiliza 5 kW/día¹. Este valor proporciona una medida del tamaño de las cinco escalas, a utilizar, del convertidor VIVACE.

A continuación, se muestran en la tabla 2.2 los resultados de potencias obtenidos para las cinco escalas desde micro hasta mega calculadas para el mínimo valor de velocidad de la corriente marina en la zona de estudio de 0.5 m/s.

Tabla 2.2 Potencia generada según la escala de VIVACE (Fuente: Elaboración propia)

Escala	D (m)	L (m)	No. cilindros	H (m)	S (m ²)	Pv (watt)
Mega	2	20	6570	30	258998	3703837,5
Grande	1	20	1314	15	14569	370383,75
Medio	0,5	10	526	15	2482	37066,5625
Pequeño	0,2	4	358	5	92	4036,45
Micro	0,1	2	657	5	45	1851,91875

En la tabla 2.3 se muestra los valores de potencia generada según el sistema VIVACE para un año.

¹ <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2010-08-10/apetito-energetico/> consultado: mayo 2016

Tabla 2.3 Potencias generadas por el sistema en el año (Fuente: Elaboración propia)

Escala	Pv (watt)	W/año	Pv (kW)	kW/año	Pv (MW)	MW/año
Mega	3703837,5	32445616500	3703,8375	32445616,5	3,7038375	32445,6165
Grande	370383,75	3244561650	370,38375	3244561,65	0,37038375	3244,56165
Medio	37066,5625	324703087,5	37,0665625	324703,088	0,03706656	324,703088
Pequeña	4036,45	35359302	4,03645	35359,302	0,00403645	35,359302
Micro	1851,91875	16222808,25	1,85191875	16222,8083	0,00185192	16,2228083

Se calcula las potencias generadas por el sistema para las mismas escalas usadas anteriormente, pero para una velocidad de la corriente marina de 1 m/s, obteniéndose los siguientes resultados (ver tabla 2.4 y 2.5)

Tabla 2.4 Potencia generada según la escala de VIVACE (Fuente: Elaboración propia)

Escala	D (m)	L (m)	No. cilindros	H (m)	S(m ²)	Pv (watt)
Mega	2	20	6570	30	258998	29630700
Grande	1	20	1314	15	14569	2963070
Medio	0,5	10	526	15	2482	296532,5
Pequeña	0,2	4	358	5	92	32291,6
Micro	0,1	2	657	5	45	14815,35

Tabla 2.5 Potencia generada por el sistema en el año (Fuente: Elaboración propia)

Escala	Pv (watt)	W/año	Pv (kW)	kW/año	Pv (MW)	MW/año
Mega	29630700	2,59565E+11	29630,7	259564932	29,6307	259564,932
Grande	2963070	25956493200	2963,07	25956493,2	2,96307	25956,4932
Medio	296532,5	2597624700	296,5325	2597624,7	0,2965325	2597,6247
Pequeño	32291,6	282874416	32,2916	282874,416	0,0322916	282,874416
Micro	14815,35	129782466	14,81535	129782,466	0,01481535	129,782466

- Análisis de los resultados

Según datos de la Empresa Eléctrica (2015), el municipio de Gibara cuenta con 27409 clientes, los cuales generan un consumo promedio mensual de 5493.3 MW, lo que representa un consumo de 1521,64 ton de petróleo.

En las tablas 2.6 y 2.7 se muestran el ahorro del consumo de electricidad en la ciudad de Gibara mensual, así como el porciento de ahorro de consumo y las toneladas de petróleo, para las diferentes escalas del sistema VIVACE, en dependencia de las velocidades de las corrientes marinas de 0,5-1m/s.

Tabla 2.6 Ahorro de combustible equivalente a la potencia generada en un mes, por las corrientes marinas para 0.5 m/s en Gibara. (Fuente: Elaboración propia)

Escala	Pv (MW)	MW/mensual	Consumo promedio mensual (MW)	% de ahorro mensual	Ahorro de combustible (t/kWh)	Ahorro de combustible para un mes (t)
Mega	3,7038375	2703,801375		49,2199839	1,025962988	738,693351
Grande	0,37038375	270,3801375		4,92199839	0,102596299	73,8693351
Medio	0,037066563	27,05859063	5493.3	0,49257442	0,010267438	7,39255523
Pequeño	0,00403645	2,9466085		0,05364004	0,001118097	0,80502959
Micro	0,001851919	1,351900688		0,02460999	0,000512981	0,36934668

Tabla 2.7 Ahorro de combustible equivalente a la potencia generada en un mes, por las corrientes marinas para 1 m/s en Gibara. (Fuente: Elaboración propia)

Escala	Pv (MW)	MW/mensual	Consumo promedio mensual (MW)	% de ahorro mensual	Ahorro de combustible (t/kWh)	Ahorro de combustible para un mes (t)
Mega	29,6307	21630,411		393,759871	8,2077039	5909,54681
Grande	2,96307	2163,0411		39,3759871	0,82077039	590,954681
Medio	0,2965325	216,468725	5493.3	3,94059536	0,082139503	59,1404418
Pequeño	0,0322916	23,572868		0,42912035	0,008944773	6,4402367
Micro	0,01481535	10,8152055		0,19687994	0,004103852	2,9547734

2.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se seleccionó el sistema VIVACE dentro del método de generación debido a las características de las costas de la bahía de Gibara. Se determinó la potencia generada por el sistema VIVACE para las corrientes marinas de 0.5 m/s y 1 m/s en las costas de Gibara, y se obtuvo la potencia generada al año mostrando el ahorro de petróleo que varía desde 0,36934668 t hasta las 5909,54681t al mes, dependiendo de las velocidades de las corrientes marinas y de la escala a emplear en la construcción del emplazamiento.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Los antecedentes históricos y los fundamentos teóricos – metodológicos en el empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica, permitieron la selección del método de generación para su evaluación en la zona de estudio.
2. Se determinó el estado actual del empleo de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en el municipio de Gibara, evidenciando la carencia de investigación en la temática, lo que permitió el desarrollo de la investigación, y la aplicación del método seleccionado.
3. Se diagnosticaron las potencialidades que presenta el empleo de la energía mareomotriz en el municipio de Gibara para la generación de energía eléctrica, aplicando el método generador de corriente de marea con el sistema VIVACE. Como resultado se obtuvo la potencia del sistema en un año y el ahorro de combustible que representa su implementación, para las velocidades de 0.5 m/s y 1 m/s.

RECOMENDACIONES

1. Divulgar los resultados obtenidos en la investigación en diferentes eventos y conferencias de Energías Renovables, por la pertinencia y el impacto social del tema.
2. Sugerir a la Empresa Eléctrica, el diagnóstico de las potencialidades de la energía mareomotriz para la generación de energía eléctrica en otras zonas de estudio del país aplicando el sistema VIVACE.
3. Proponer al Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín, continuar profundizando en el tema de investigación con la determinación del costo de inversión y el estudio de factibilidad para la implementación del sistema VIVACE.

BIBLIOGRAFÍA

¿Cómo se genera la electricidad? (17 de octubre de 2012). Obtenido de <http://twenergy.com/a/como-se-genera-la-electricidad-666>

Batanga. (24 de abril de 2016). Obtenido de (<http://www.batanga.com/curiosidades/6885/todo-lo-que-quieres-saber-sobre-las-mareas-y-sus-curiosas-caracteristicas>)

Bernitsas, M. M. (2008). *VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy) A New in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow*. Michigan: colibri.

Canavaciolo, R. S. (2007). *La energía de las corrientes de mareas. Canal de acceso a la bahía de Nuevitas*. Universidad de Camaguey , Grupo de Investigaciones de la Energía Marina (GIEM).

Charlier, R. (2002). Resurgimiento or Aggiornamento? Tidal Power at 30 years. *Journal of Renew Sustainable Energy*.

Energía de las corrientes marinas. (4 de mayo de 2016). Obtenido de <http://pfernandezdiez.es>

Energía Mareomotriz. (22 de abril de 2016). Obtenido de <http://EcuRed.htm>.

Energía marina. (2016). Obtenido de *Energía marina*: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_marina

Flores, V. H. (2013). *Ingeniería preliminar de opciones de aprovechamiento de energía de fuentes no renovables para la implementación en la ampliación del campus San Cayetano de la UTPL: sistemas de hidrogenación basados en vórtices gravitacionales*. Universidad católica de Loja, Loja Ecuador.

Forcadell, J. E. (2011). *Estudio de la amplitud de marea en los puertos españoles del mediterráneo*. Universidad Politécnica de Catalunya, Facultad de Náutica de Barcelona.

Ganzirri, il Peloro e lo Stretto di Messina. (4 de mayo de 2016). Obtenido de <http://ganzirri.it/spip.php?article53>

Gonzales, J. L. (2009). *Cuantificación de energía de una planta mareomotriz*. Mexico.

González, M. H. (2009). *MEDICIONES Y TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DEL NIVEL DEL MAR EN CUBA*. Instituto de Oceanología, Ciudad de la Habana.

historia y biografías. (abril de 2016). Obtenido de <http://historiaybiografias.com/porque7/>

Historia y biografías. (abril de 2016). Obtenido de <http://historiaybiografias.com/porque7/>

intercuba. (24 de abril de 2016). Obtenido de https://intercuba.net/wiki/articles/c/o/r/Corriente_marina.html

KUNZE, J. S. (2008). *APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO DE LAS MAREAS Y SU POSIBLE DESARROLLO EN CHILE*. UNIVERSIDAD DE CHILE, FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL.

López, A. (14 de mayo de 2014). *La energía mareomotriz, la energía del mar*. Obtenido de <https://smienergias.wordpress.com/category/energia-mareomotriz/la-energia-mareomotriz/>

Lunar Energy. (4 de mayo de 2016). Obtenido de <http://www.lunarenergy.co.uk/>

Martínez, J. M. (2012). *Estudio de las centrales de aprovechamiento de la energía mareomotriz*. Universidad Politécnica de Catalunya, Expresión Gráfica.

Mayo, A. H. (2016). Particularidades hidrometeorológicas del litoral Gibara-Playa Guardalavaca. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2), 152-163.

Mayo, A. H. (2016). Tendencias climáticas de las inundaciones costeras en el litoral Gibara-Playa Guardalavaca, provincia Holguín, Cuba. *Revista de Climatología*, 15, 93-102.

Montesinos, A. (2016). BOLETÍN INFORMATIVO DIGITAL RENOVABLE.CU. *Energía y tu*, No.49. Obtenido de <http://www.cubaenergia.cu>

París, M. G. (2013). *Energía Mareomotriz: Tecnologías de extracción*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniería Hidráulica y Ambiental PUC.

Portal del Ingeniero Ambiental. (22 de abril de 2016). Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com.2016>

Rodríguez, E. (14 de abril de 2014). *En construcción -Energía y Electrónica*. Obtenido de <http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-mareomotriz-mas-grandes-del-mundo/>

Rodriguez, E. (2014). *En construccion -Energia y Electronica*.

SeaPower. (4 de mayo de 2016). Obtenido de <http://www.seapower.se/>

Subsea oil y gas directory. (4 de abril de 2016). Obtenido de <http://www.subsea.org/>

THE GULF STREAM TURBINE. (4 de abril de 2016). Obtenido de <http://www.gulfstreamturbine.com/>

wikipedia. (22 de abril de 2016). Obtenido de <http://www.wikipedia.org>

Wikipedia. (30 de abril de 2016). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_potencial

Wikipedia. (10 de mayo de 2016). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Gibara#Bah.C3.ADa_de_Gibara

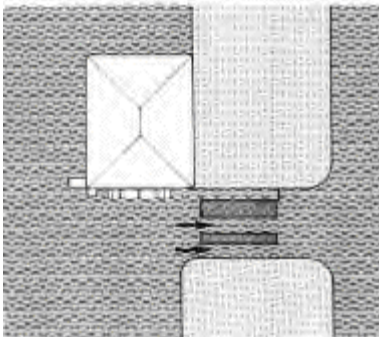
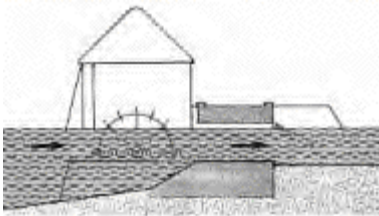
ANEXOS

Anexo 1



Figura 2.6 Antiguo molino de mareas en Isla Cristina (Huelva).
Fuente: (Wikipedia, 2016)

Anexo 2



Figuras 2.7, 2.8, 2.9 Imágenes de molinos de marea
Fuente: (Martínez, 2012)

Anexo 3



Figura 2.10 Vista de la construcción de la central mareomotriz de La Rance
Fuente : (Libro de energía mareomotriz)

Anexo 4



Figura 2.11 Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá
Fuente: (Rodriguez, En construccion -Energia y Electronica, 2014)

Anexo 5



Figura 2.10 Planta de Energía Mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur
Fuente: (Rodríguez, En construcción -Energía y Electrónica, 2014)