

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

Cambio climático
en la eficiencia
de centrales
termoeléctricas

*International
Tendencies on
Energy Security:
National Policies*

*Análisis de la
Primera
Generación Eólica
Argentina*

Potencial Energético
de corrientes de las
mareas en el litoral
argentino

Mercado de Gas Natural
en Sudamérica y la nueva
posición Competitiva
de Bolivia



COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco
SECRETARIO EJECUTIVO DE OLADE

Pablo Garcés
ASESOR TÉCNICO DE OLADE

Marcelo Vega
COORDINADOR DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DE LA
ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO
(AUGM)

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Blanca Guanocunga. Bibliotecaria OLADE.

COLABORADORES

Raquel Atiaja. *Técnica de Área Informática OLADE*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación*

REVISORES

Rubén D Piacentini. *Universidad Nacional del Rosario
(UNR). Argentina*

Byron Chiliquinga. *Consultor independiente. Ecuador*

Walter Gustavo Morales. *Universidad Tecnológica Nacional
(UTN). Argentina*

José Medardo Cadena. *Organización Latinoamericana de
Energía (OLADE). Ecuador*

Héctor Chávez. *Universidad Santiago de Chile (USACH). Chile*

Andrés Schuschny. *Organización Latinoamericana de Energía
(OLADE). Ecuador*

Alejandro Gutiérrez Arce. *Universidad de la República
(UDELAR). Uruguay*

Ramiro Rodríguez. *Universidad Nacional de Córdoba
(UNC). Argentina*

Guillermo Garrido. *Instituto Nacional de Tecnología Industrial
(INTI). Argentina*

Mauricio Medinaceli Monrroy. *Consultor independiente.
Bolivia*

Christian Hernández Martínez. *Instituto Mexicano del
Petróleo (IMP). México.*

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía
(OLADE) 2019. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)
ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y
Fernández Salvador.
Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>
Página web OLADE: www.olade.org
Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995 /
2599-489

Fotografías de la portada y contraportada licenciada por
Ingram Image.

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad
de los autores y no comprometen a las organizaciones
mencionadas.



ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE CORRIENTES DE MAREAS EN EL LITORAL DE LA PROVINCIA DE CHUBUT, ARGENTINA

Ana Julia Lifschitz¹, Norma Beatriz de Cristòfaro², Doménico P. Coiro³

Recibido: 11/03/2019 y Aceptado: 31/05/2019
ENERLAC. Volumen III. Número 1. Septiembre, 2019 (60-77).





1 Licenciatura en Oceanografía en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN), Universidad de Buenos Aires (UBA). Maestría en Ciencias Ambientales en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (UBA). Estudiante de doctorado en Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Chubut (FRCH), Argentina. Integra Proyecto de Investigación: Desarrollo de turbinas hidrocínéticas y estudio de la resistencia de materiales, en aguas dulces y marinas, en diferentes condiciones fluido dinámicas. Cargo docente: auxiliar en la carrera de Ingeniería Pesquera, Ingeniería Electromecánica y en la carrera de Licenciatura en Organización Industrial en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN - FRCH). anajulialif@gmail.com

2 Ingeniera Química en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Avellaneda, Argentina. Doctora en Ciencias de Materiales, Materias Primas y Procesos en la Universidad La Sapienza de Italia. Trabajó en el sector electroquímica aplicada del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Argentina. Durante 1987 fue investigadora invitada en la Universidad Técnica de Clausthal, Alemania. En el período 1991-1992, se desempeñó en el Ente Nacional para la Energía Alternativa (ENEA), Italia. En 1992, obtuvo el cargo de investigador en el Centro de Desarrollo de Materiales de Roma. Actualmente, directora del Grupo Energía, Materiales y Sustentabilidad de la UTN, Facultad Regional de Chubut, Argentina. normadecristofaro@yahoo.it

3 Profesor en el Departamento de Ingeniería Industrial, División Aeroespacial de la Universidad de Nápoles Federico II, Italia. Autor de más de 100 artículos publicados en revistas y congresos internacionales. De 1986 a 1997 trabajó en el campo de la aerodinámica, mecánica de vuelo e hidrodinámica. Trabaja en el campo de la energía oceánica desde 1998. Coordinó el diseño, desarrollo, pruebas de modelos en tanques de remolque y el despliegue y prueba de prototipos a gran escala en campos reales basados en turbinas hidráulicas de ejes horizontales y verticales. Autor de varias patentes en el campo de las energías renovables. También coordina el desarrollo de un convertidor de energía de las olas. Es un evaluador experto del proyecto de energía renovable para la Comunidad Europea, así como para los ministerios italianos e instituciones públicas. Fundador y presidente del consorcio público / privado de investigación sin fines de lucro SEAPOWER, que participa en la Universidad de Nápoles. coiro@unina.it

RESUMEN

En este trabajo se describen las características del fenómeno de las mareas en el litoral chubutense y se analizan algunos sitios adecuados para el potencial aprovechamiento de la energía de estas y sus corrientes asociadas. Además, se revisan los proyectos presentados en la Provincia de Chubut y se efectúa una evaluación preliminar del recurso energético de los Golfos chubutenses. Se considera la posibilidad del aprovechamiento energético de las mareas transformando el movimiento de desplazamiento en un movimiento de rotación por medio de una turbina hidrocínética. Esta energía puede ser extraída de manera análoga a la de la energía eólica, por lo tanto, no es necesario construir una represa, de este modo se evitan los inconvenientes ambientales y económicos que esta representa.

Palabras Clave: Fenómeno de Mareas, Corrientes de Mareas, Recurso en el Litoral Chubutense, Energía Mareomotriz, Turbinas Hidrocínéticas.

ABSTRACT

This paper describes the characteristics of the tidal phenomenon in the Chubut coast and analyzes some suitable sites for the potential use of the energy of these and their associated currents. In addition, the projects presented in the Province of Chubut are reviewed and a preliminary evaluation of the energy resource of the Chubut Gulfs is made. The possibility of energetic utilization of the tides is considered, transforming the displacement movement into a rotation movement by means of a hydrokinetic turbine. The energy can be extracted analogously to that of wind energy; therefore, it is not necessary to build a dam, thus avoiding the environmental and economic disadvantages it represents.

Keywords: *Phenomenon of Tides, Tidal Currents, Resource on the Chubut coast, Tidal Energy, Hydrokinetic Turbines.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se está reconociendo el importante potencial de generación de energía eléctrica mediante la instalación de turbinas hidrocínéticas, para aprovechar las corrientes de mareas (catálogo GEMA 2018). La potencia teórica asociada a las mareas (incluyendo las corrientes asociadas) ha sido estimada globalmente en alrededor de 7.800Twh/año (reporte de OES, 2011). Las mareas están definidas como el cambio en el nivel de las aguas del mar. Estas se pueden dividir en marea astronómica y marea meteorológica. La primera se debe al movimiento periódico de ascenso y descenso del mar producido por la atracción gravitatoria del sol y de la luna y a la rotación terrestre; la segunda es producida por el viento. Las corrientes inducidas por mareas se generan por el tránsito de la onda de marea; esto ocasiona que en bahías con boca estrecha se produzcan grandes velocidades que pueden ser aprovechadas para la generación energética. Además, las corrientes de mareas presentan la característica de ser predecibles y fiables, lo cual determina que este recurso sea particularmente atractivo para su uso en la generación de energía.

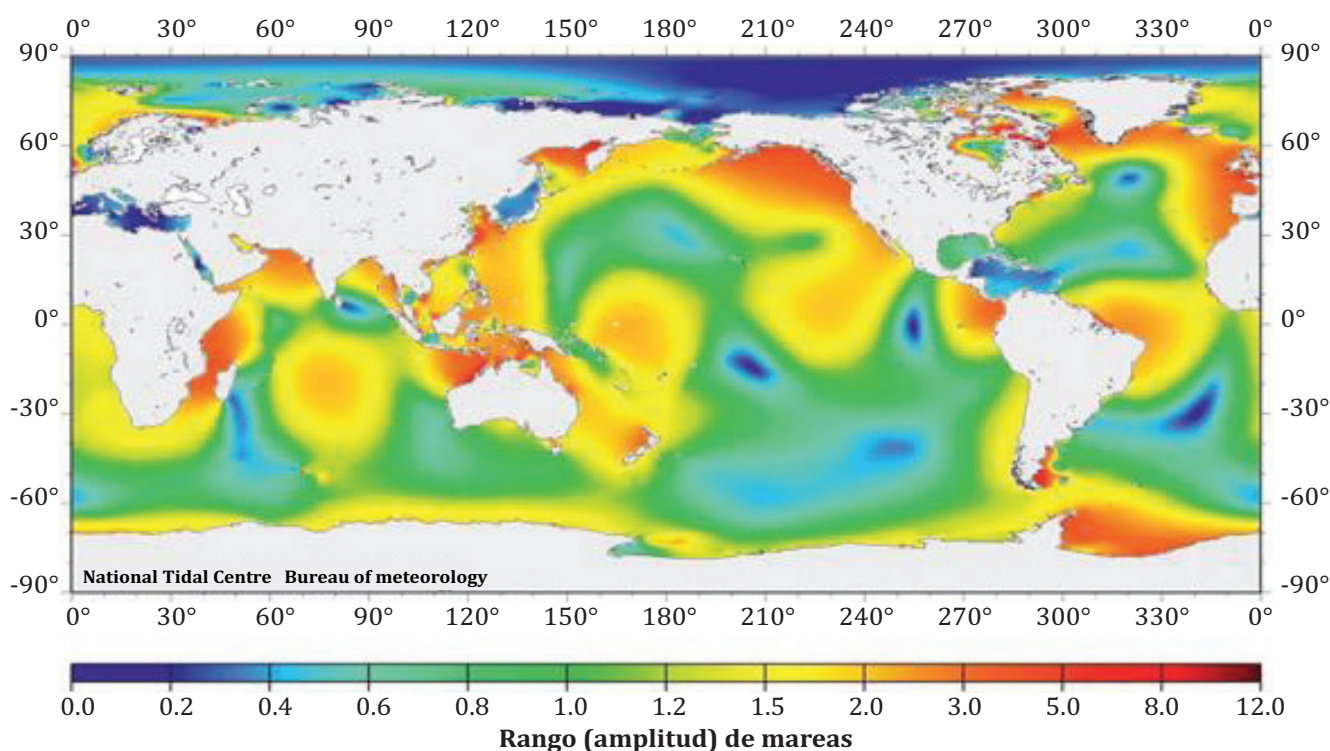
La amplitud de la marea es muy diferente de un litoral marítimo a otro, por ejemplo, en el Océano Pacífico y en el Mar Mediterráneo alcanza valores muy bajos, solo decenas de centímetros; por el contrario, se amplifica y alcanza valores notables en determinados sitios, donde la profundidad del mar es baja, o la costa presenta pendiente reducida, o donde exista una geometría que produzca interferencia por las costas, o por la existencia de fenómenos de resonancia como sucede en algunas bahías en las que el agua puede subir su nivel varios metros debido a que su tiempo de llenado y de vaciado coincide con el período de la marea. En el Atlántico Sur se observan significativas amplitudes de marea, si bien existe un número limitado de zonas donde es posible la explotación de la energía mareomotriz. La Figura 1 muestra la distribución mundial

de las alturas de marea media. En general, a mayor altura de marea, se asocian mayores velocidades de flujo. Por lo tanto, en mar abierto las velocidades de las corrientes de mareas no son muy intensas. A medida que estas corrientes encuentran obstáculos topográficos tales como la costa, bahías con bocas pequeñas, canales angostos o someros, o circulaciones alrededor de islas, las velocidades de las corrientes se intensifican (Adcock & Draper, 2014; Elliot, 2012). Por ejemplo: el rango (amplitud) de mareas en la Bahía de Fundy en Canadá es de 15 m, en el Estuario de Severn en UK alcanza los 12m. La amplitud de mareas en el litoral Atlántico

Sur de nuestro país, por su latitud, es una de las mayores del mundo después de los dos sitios mencionados (*Renewable Energy Agency*, agosto 2014).

El potencial de generación eléctrica de las corrientes de marea es muy alto. Estas corrientes se consideran un recurso para la generación sustentable de energía eléctrica. El alto factor de carga resultante de las propiedades del fluido y sus características de predictibilidad hacen a este recurso particularmente atractivo para la generación energética con respecto a otras energías renovables.

Figura 1. Mapa mundial de alturas de marea media.



Fuente: Renewable Energy Agency, agosto 2014.

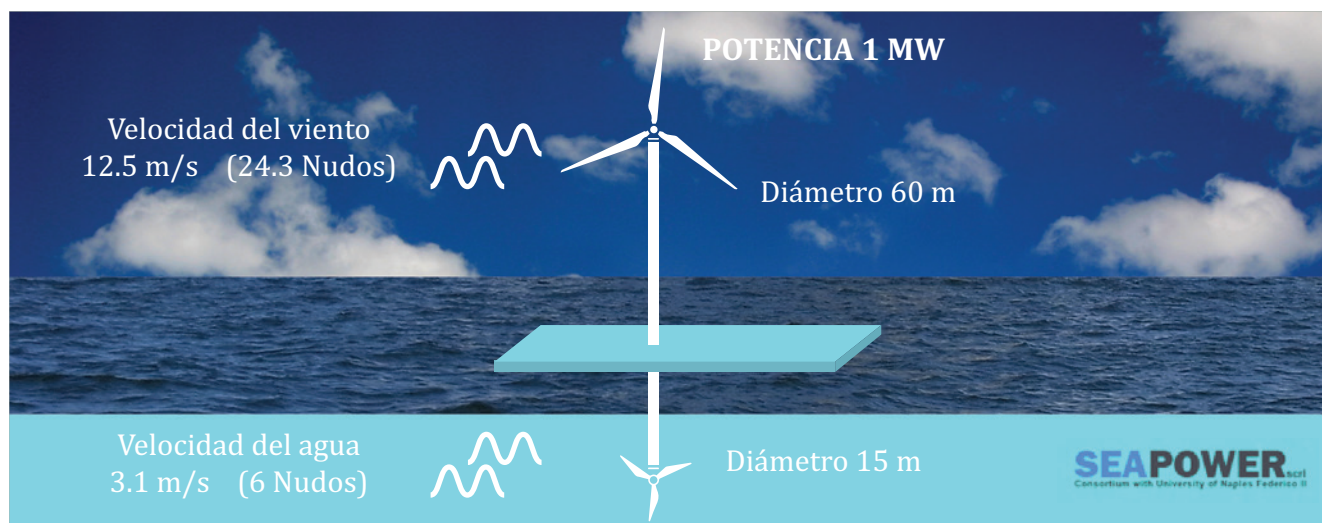
En el presente trabajo se describen las características del fenómeno de las mareas astronómicas en el litoral argentino y se analizan potenciales sitios para el aprovechamiento energético.

CARACTERÍSTICAS DE LAS MAREAS EN EL LITORAL ARGENTINO Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.

En el litoral atlántico argentino se verifican diariamente dos situaciones de flujo en la dirección de propagación de la onda de marea, y dos de reflujo, opuestas a las anteriores, pero con intensidades semejantes. Entre ambas condiciones se observa un período de duración que oscila desde unos minutos hasta una hora, conocido como 'estoa', durante el cual las corrientes son prácticamente nulas. Un poco antes de las estoas, las corrientes de marea se debilitan gradualmente en intensidad, para luego incrementarse progresivamente hasta alcanzar magnitudes máximas con un cambio de rumbo de aproximadamente 180°. Consecuentemente, la corriente de marea presenta una variabilidad temporal cíclica, situación que conlleva a pensar en dispositivos energéticos bidireccionales. Además del ciclo diario de las mareas, se debe mencionar el ciclo mensual, en el que ocurren situaciones de amplitudes máximas, con las mayores intensidades de corrientes (marea de sicigias) y de amplitudes mínimas con intensidades más bajas (cuadratura), relacionadas a las posiciones relativas del sistema Tierra-Luna-Sol.

La energía de las mareas presenta dos componentes: energía potencial, asociada a la amplitud de mareas, y energía cinética, resultante de las velocidades de corrientes asociadas. En el presente trabajo, la estimación de energía está referida a la energía cinética. Como esta energía se genera por el flujo de agua, este flujo de energía se puede aprovechar, transformando el movimiento de desplazamiento en un movimiento de rotación por medio de una turbina hidrocínética (THC), dispositivo similar a los rotores de las turbinas eólicas, que acoplada a un generador produce energía eléctrica. La energía puede ser extraída de manera análoga a la de la energía eólica, por lo tanto, no es necesario construir una represa. La diferencia principal entre los dos dispositivos radica en la densidad del fluido. Puesto que el agua de mar posee una densidad aproximadamente 837 veces superior (1.025g/m^3 a 1 atm y 15°C) a la del aire (1.225g/m^3 , a 1 atm y 15°C), es posible generar electricidad a baja velocidad del fluido. Esto significa que para una misma potencia se puede reducir, significativamente, el tamaño del rotor de una turbina. Este hecho se ilustra en la Figura 2, donde, se observa que, para obtener la misma potencia, con velocidades típicas de corrientes de viento y agua, son necesarios dos diámetros de aspas distintos

Figura 2. Comparación de tamaños de turbinas para obtener la misma potencia nominal en agua y aire.



Fuente: SeaPowerscrl Consortium with University of Naples Federico II.

Estos equipos tienen la posibilidad de aprovechar el flujo y reflujo cíclico del agua de mar trabajando en un sentido de corriente, durante el proceso de ascenso de la marea, y en sentido opuesto, en su descenso. Este tipo de funcionamiento se logra de dos formas:

- a) Utilizando aspas reversibles o de paso ajustable, ó
- b) Girando completamente la ubicación de la turbina de acuerdo al sentido de marea.

ANTECEDENTES DE PROYECTOS ENERGÉTICOS DE MAREAS EN CHUBUT, ARGENTINA.

Los primeros estudios se focalizaron en la Península de Valdés, ubicada en la zona noreste de Chubut, circundada por los golfos San José, al norte, alimentado por el Golfo San Matías, y el Golfo Nuevo, al sur, alimentado por el Océano Atlántico, ubicados a ambos lados del istmo Ameghino que une la península mencionada con el continente.

En la zona de península de Valdés (Figura 3), al fenómeno de apreciable altura de las mareas, (Tabla 1) se le suma otro de origen topográfico que favorece la reflexión de las aguas y perturba la propagación de las corrientes marinas. Este fenómeno produce un desfase horario entre 4 a 6 horas constante entre las alturas de mareas del golfo San José y del golfo Nuevo, que resulta en una diferencia de nivel de entre 5 y 8 m. Es decir que, mientras en uno de estos golfos la marea está próxima a la pleamar, en el otro está cerca de la bajamar y recíprocamente. Este evento se repite constantemente a través del tiempo.

En definitiva, el fenómeno que en otras zonas se logra aprisionando con compuertas o cierres las desembocaduras de las bahías, aquí, en la zona citada, lo brinda la naturaleza. Se encuentra, pues, frente a una configuración de mareas excepcional y extremadamente favorable que llevo a que, en el transcurso del tiempo, se proyectaran diversos aprovechamientos energéticos.

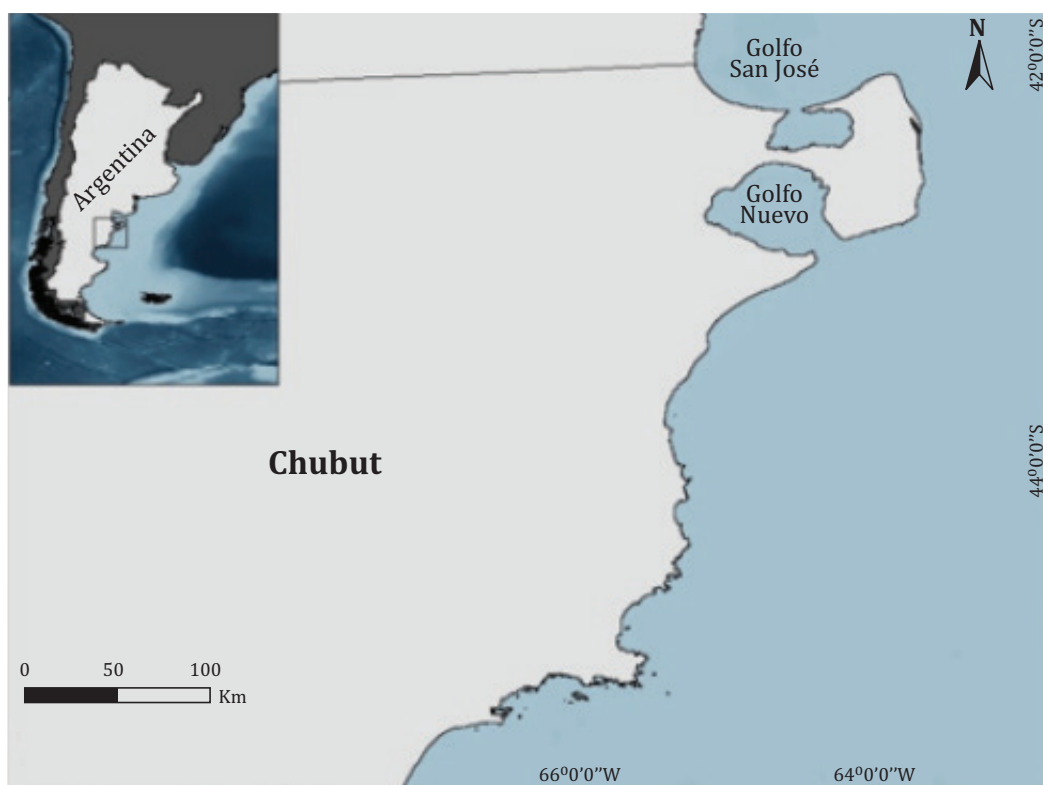
Tabla 1. Energía potencial de algunos sitios en el mundo.

País	Rango medio de marea m	Área cuenca km ²	Capacidad instalada MW	Output anual (aprox.) TWh/año	Factor de carga anual %
ARGENTINA					
San José	5.8	778	5040	9.4	21
Golfo Nuevo	3.7	2376	6570	16.8	29
Río Deseado	3.6	73	180	0.45	28
Santa Cruz	7.5	222	2420	6.1	29
Río Gallegos	7.5	177	1900	4.8	29
AUSTRALIA					
Secure Bay	7.0	140	1480	2.9	22
Walcott Inlet	7.0	260	2800	5.4	22
CANADA					
Cobequid	12.4	240	5338	14.0	30
Cumberland	10.9	90	1400	3.4	28
Shepody	10.0	115	1800	4.8	30

INDIA					
Gulf of Kachchh (Kutch)	5.0	170	900	1.6	22
Gulf of Cambay (Khambat)	7.0	1970	7000	15.0	24
KOREA (REP)					
Garolim	4.7	100	400	0.836	24
Cheonsu	4.5	-	-	1.2	-
MEXICO					
Río Colorado	6 a 7	-	-	54	-
USA					
Passamaquoddy	5.5	-	-	-	-
Knik Arm	7.5	-	2900	7.4	29
Turnagain Arm	7.5	-	6500	16.6	29
FEDERACIÓN DE RUSIA					
Mezeh	6.7	2640	15000	45	34
Tugur	6.8	1080	7800	16.2	24
Penzhinsk	11.4	20530	87400	190	25

Fuente: Adaptado de World Energy Council, 2003.

Figura 3. Península Valdés, Provincia de Chubut.



Fuente: Instituto Geográfico Militar.

En la década del sesenta se propusieron varios proyectos de aprovechamiento energético de mareas, pero ninguno de ellos progresó debido a los altos costos de inversión (Chingotto, 2005). En esa época, la variable ambiental no era considerada tan importante como lo es en el presente, y afortunadamente, estos planes no se concretaron, pues ambos golfos difieren en sus características oceanográficas (temperatura, salinidad) y biológicas. El impacto ecológico de unir ambos golfos hubiera sido catastrófico. El sistema de la Península de Valdés constituye una reserva natural de extrema importancia para el ecosistema marino, y diversos argumentos de conservación han impedido que se avance más en la zona, declarada en diciembre de 1999, "Patrimonio Natural de la Humanidad".

En 2013, se realizó otro proyecto que consistió en la construcción de un puente y dique de

mareas en el estuario del río Chubut. El objetivo fue generar energía y realizar una expansión agrícola para recuperar hectáreas productivas, a través de un dique de contención en el río situado muy cerca de su desembocadura en el Océano Atlántico. El proyecto preveía la colocación de dos turbinas que generarían en total 10MW de potencia. Además de la construcción del dique para la generación de energía y la posibilidad de irrigar el agua a tierras para convertirlas en productivas, se pretendía originar un impacto turístico a causa del puente que uniría el Puerto Rawson con un sector de playa conocida como "Playa Magagna". El objetivo original del proyecto se concretó parcialmente, ya que solamente se construyó el puente, inaugurado en 2016. La Tabla 2 resume algunos de los proyectos presentados que no lograron su concreción.

Tabla 2. Proyectos de producción energética considerados para su instalación en la Península Valdés, Provincia de Chubut, período 1949-2013.

Propuesta	Año	Capacidad (MW)	Sistema
Oca Balda y Romero	1928	2000	Cierre del golfo de San José, operación con embalse simple.
Erramuspe	1949	55	Apertura canal en itsmo, operación combinando golfos.
Loschakoft	1957	1200	Cierre de ambos golfos.
Sogreah	1959	600	Apertura canal en itsmo, operación combinando golfos.
Fenzloff	1972	4900 a 6800	Apertura canal en itsmo, operación combinando golfos.
Agua y Energía	1975	5300	Central adicional de acumulación p/ bombeo.
Aisicks y Zyngierman	1984	5040	Cierre del golfo San José, operación con embalse simple.
Secretría de Producción y Medio Ambiente de Rawson	2013	10	Puente y dique de mareas en el estuario del río Chubut, dos turbinas hidrocínicas.

Fuente: Adaptado de Chingotto 2005.

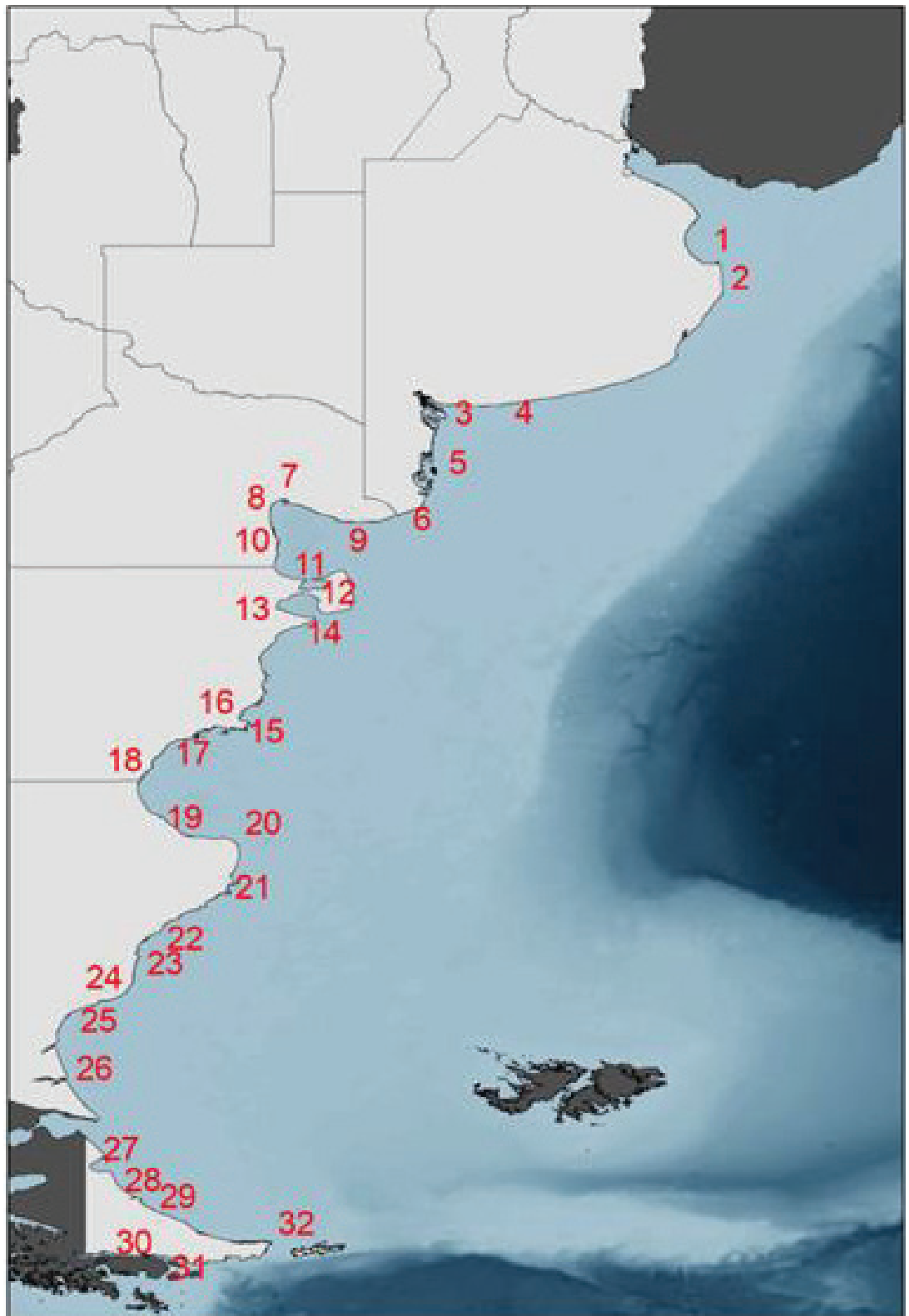
El Servicio de Hidrografía Naval (SHN - Ministerio de Defensa) cuenta con una base de registros de corrientes que datan desde la década del sesenta y del setenta hasta la actualidad. Muchos de ellos se obtuvieron por el propio SHN, y otros tantos cedidos por terceros (por ejemplo, empresas y petroleras). Basada en esta información de campo, Dragani et al 2016, realizaron un análisis sintético de las corrientes a lo largo del litoral argentino, entre la costa y la isobata de 15/20 m. (Figura 4, referencias en Tabla 3).

Según el relevamiento de datos históricos del SHN para el litoral atlántico argentino, más la batimetría obtenida de cartas náuticas, se sugieren zonas que podrían ser de posible aprovechamiento energético de corrientes de marea. La amplitud de marea presente en la región, en conjunto con la geomorfología carac-

terística de la zona crea condiciones para la explotación del recurso a partir de sistemas de generación eléctrica hidrocinéticos. La región costera patagónica comprendida entre el Sur del golfo San Matías y Tierra del Fuego presenta las mayores intensidades de corriente. En particular, el interior de las rías santacruceñas (Deseado, San Julián, Santa Cruz, Gallegos) y en los Golfos chubutenses (San José y Nuevo) donde se dan las mayores intensidades de corriente de marea, las cuales podrían superar 1.5 m/s. Las corrientes son muy intensas en la boca del golfo San José pudiendo alcanzar en sicigia casi los 2 m/s. En su interior, las corrientes se reducen considerablemente y no llegan a superar los 0.30 m/s. Las corrientes en la boca del Golfo Nuevo pueden alcanzar 0.80 m/s en condiciones de sicigia, pero se reducen drásticamente hacia el interior del golfo y no exceden los 0.20/0.30 m/s.



Figura 4. Potencial de mareas y las corrientes asociadas en el litoral argentino (ver referencias en Tabla 3).



Fuente: Elaboración de los autores.

La Tabla 4 presenta un cuadro general donde se resumen las características del recurso, de algunas zonas de la provincia de Chubut consideradas para su análisis. La información presentada se extrajo de la base de datos del SHN, de cartas náuticas y de datos suministrados por autoridades provinciales e inspecciones realizadas por los autores.

Para que las corrientes de marea sean aprovechables desde un punto de vista energético deben superar un valor mínimo durante un gran porcentaje de tiempo de su ciclo. Para la mayoría de los investigadores este valor oscila entre 1,5 a 2,5 m/s. Polo et al 2008, indica un valor superior a 2m/s, la *Electric Power Research Institute Inc. (EPRI), 2005*, recomienda lugares que tengan flujos máximos mayores a 1.5 m/s; a su vez, para la *World Energy Council - World Energy Resources 2016* y *Aqua-RET 2012*, *Tidal*

Stream - European Resource Map los lugares apropiados son los que presentan corrientes de mareas medias en sicigias como mínimo de 2-2.5m/s.

Mareas y corrientes asociadas en la zona de Península de Valdés. Se poseen datos públicos de velocidades de corrientes de marea, solamente para las bocas de los golfos San José y Nuevo. En lo que respecta al Golfo San José, en la zona de Punta Quiroga (oeste) se midieron velocidades comprendidas entre 1 y 3 m/s, velocidades menores (0.6 m/s) se midieron en la zona Punta Buenos Aires (este). En estos sitios se registraron profundidades de 36 y 27 m (cartas náuticas, SHN). Si bien el acceso a las zonas se puede realizar por mar y por tierra, a través de estancias privadas, la ausencia de infraestructura complicaría una eventual instalación de un sistema de turbinas hidrocinéticas.

Tabla 3. Potencial de mareas y las corrientes asociadas en el litoral argentino, referencias de la Figura 4.

Número	Nombre	Velocidad Max. (m/s)	Profundidad (m)
1	Punta Rasa	0.4-0.6	1.5
2	Punta Médanos	> 0.3	< 10
3	Ria de Bahía Blanca	> 1	9
4	Monte Hermoso	0.3	0.4
5	Ria San Blas	> 1	3.6
6	Desembocadura Río Negro	1	0.4
7	Puerto San Antonio	0.8	20
8	Las Grutas	0.5	0.6
9	Golfo San Matías	> 1	100
10	Punta Colorada	0.5	0.9
11	Boca Golfo San José	2	130
12	Interior Golfo San José	0.3	60
13	Interior Golfo Nuevo	< 0.2-0.3	150
14	Boca Golfo Nuevo	0.8	120
15	Bahía Bustamante	0.2	<20
16	Faro Aristizabal	0.3	20
17	Bahía Solano	0.2	16

18	Puerto Comodoro Rivadavia	0.3	36
19	Caleta Olivia, Caleta Paula	0.2	7.3
20	Faro Cabo Blanco	1.3	<4.6
21	Puerto Deseado	1.5	<5.5
22	Punta Desengaño	0.7	6.9
23	Estuario Puerto San Julián	1.5	<3
24	Estuario Puerto Santa Cruz	1.5	<8
25	Punta Quilla	3.5	<8
26	Ría del Río Gallegos	1.5	<5
27	Bahía San Sebastián	0.8	<8
28	Cabo Espiritu Santo	1	-
29	Río Grande (exterior)	0.9	-
30	Paso chico (canal de Beagle)	0.3	-
31	Paso Mackinlay (canal de Beagle)	0.5	22
32	Estrecho Le Maire	1.8	-

Fuente: Elaboración de los autores.

Estos datos preliminares sugieren que las zonas examinadas podrían ser consideradas para generar electricidad utilizando turbinas hidrocínéticas. Si bien estos dos sitios tienen características particularmente atractivas para realizar un aprovechamiento energético, en 1999 la Unesco incluyó a la península de Valdés en su lista de Patrimonios de la Humanidad. Forma parte de la red hemisférica de reservas para aves playeras. Por ley provincial XI N°20 (antes Ley 4722) se ha creado el área natural protegida península Valdés, que comprende su espacio terrestre, aéreo y una franja de tres millas marinas a su alrededor. Para el Golfo Nuevo, solo su parte norte es área de protección especial, con fuertes restricciones a la navegación e intangibilidad en la franja cercana a la costa, de unos 500 m de ancho, durante la permanencia de las ballenas (entre abril y noviembre) según Disposición N° 89/10 del 26 de mayo de 2010.

Diversos argumentos de conservación hacen necesario realizar una detallada línea de base ambiental y los correspondientes estudios de impacto que incluyan también la eventual contaminación acústica producida por los dispositivos mareométricos.

Mareas y corrientes asociadas en la desembocadura del Río Chubut. Se inspeccionó, además, el estuario del río Chubut. La inspección se focalizó en dos sitios: el puerto y el último tramo del río, paraje conocido como “El Elsa” (ubicación geográfica: 43°20’5.11”S; 65°4’0.82”O). El análisis de la batimetría del lugar, suministrada por la empresa constructora del puente y por la Secretaría de Producción Turismo y Medio Ambiente, de la Municipalidad de Rawson, señala una profundidad en el centro del cauce de 1,32m. Durante la pleamar, la marea penetra en el estuario formando una cuña salina. La amplitud media registrada, según las predicciones de la tabla de mareas realizadas por el SHN son de 3,64m. Si se toma este valor como referencia, la pleamar es de 4,47m, lo que resulta un valor de bajamar de solo 0,83m. Las velocidades asociadas a estas corrientes de marea resultan inferiores a las de las dos bocas de los golfos. Una turbina, hidrocínética, instalada en esta zona debería contar con un venturi canalizador de flujo que acelere localmente la corriente de agua para lograr velocidades adecuadas para la generación energética. El sitio presenta, además, una profundidad que dificulta la instalación de una

turbina hidrocínética. En la desembocadura del río, se han estimado profundidades de menos de 10m. En su desembocadura presenta un cauce de 60 m de ancho y sólo 0,60 m de profundidad, debido a una barra que se forma por la sedimentación del material en suspen-

sión (Ministerio de Interior, Obras Públicas y Vivienda, Chubut, 2018). Las zonas están controladas por la Prefectura Nacional Argentina por lo cual estarían protegidas contra eventuales actos de vandalismo.

Tabla 4. Características de algunos sitios en el litoral marítimo chubutense.

Zona	Sitio	Profundidad (m)	Ventajas	Desventajas / Limitaciones
Boca del Golfo San José	Punta Quiroga (oeste)	36	Acceso por tierra y por mar.	Área protegida, sin infraestructura de soporte.
	Punta Bs. As. (este)	27	Velocidades de flujo superficial 1-3 m/s en Quiroga, 0.6 m/s en Punta Bs. As.	
Boca del Golfo Nuevo	Punta Ninfas (oeste)	> 10 cerca de la costa	Acceso por tierra y por mar, altas velocidades del flujo (1.5-2.7 m/s)	
Desembocadura del Río Chubut	Puerto de Rawson	< 10	Área controlada por prefectura, infraestructura de apoyo.	Baja profundidad en escollera, escasas mediciones de corriente
	Puente El Elsa	1.32		

Fuente: Elaboración de los autores.

ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL RECURSO MAREOMOTRIZ

Una estimación preliminar de la potencia teórica correspondiente a las bocas de los golfos Nuevo y San José, se puede realizar utilizando una aproximación de las ecuaciones de movimiento y de conservación de masa en fluidos. Las suposiciones del método son las siguientes: las corrientes en la boca del recinto son constantes e iguales al flujo máximo U (m/s) (extraídas de cartas náuticas del SHN) y el área transversal del canal es constante y de forma triangular: A (m²). Dada estas suposiciones, la potencia cinética teórica de la corriente, P (kW) es proporcional al cubo de la velocidad U y al área transversal A y se define como:

$$P = 1/2 \rho \int U^3 dA = 1/2 \rho U^3 A \quad (1)$$

En la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos para el golfo Nuevo y el golfo San José. Los altos valores de potencia observados para el golfo San José se deben a la combinación de dos factores: a las altas velocidades de flujo y a una gran depresión en el centro de la boca del recinto (Rivas y Ripa, 1989), lo cual produce una gran área transversal, (Paterlini et al 2013). Esta estimación es acorde con la energía potencial mostrada en la Tabla 1, dado que existe una estrecha relación entre la energía potencial y cinética, pues a mayor amplitud de marea le

corresponde, en general, mayores velocidades de flujo. Estas suposiciones dan como resultado una sobreestimación del recurso (*Coastal Engineering Manual*. 2002., Polo et al 2008, Contreras et al 2014).

Los cálculos preliminares efectuados para el Golfo Nuevo son considerablemente menores debido a una profundidad menor, un mayor ancho de boca y una corriente inferior (máximas intensidades son de 0.82m/s).

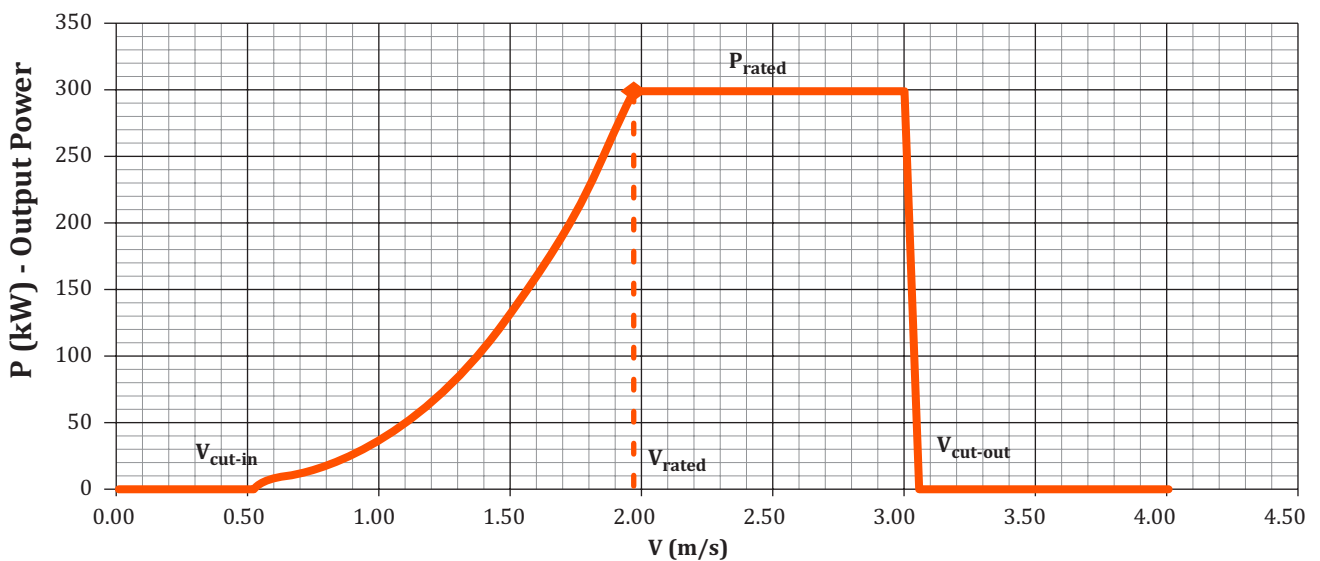
Según la ecuación (1), la potencia cinética disponible (teórica) por unidad de área es directamente proporcional al cubo de la velocidad del flujo, pero la potencia efectivamente extraíble es característica de cada dispositivo, descrito por su curva de potencia, la cual define la relación entre la velocidad del flujo y la cantidad de potencia de salida de cada dispositivo. La Figura 5 muestra una curva típica de potencia para un dispositivo hipotético de 300 kW.

Tabla 5. Estimación de la potencia cinética de la corriente marina en los golfos chubutenses Nuevo y San José.

Golfo	Nuevo	San José
Ancho canal (km)	16	6.8
Profundidad máxima canal (m)	44	130
Área transversal (m ²)	352000	442000
Rango velocidades en canal (m/s)	0.85 a 1	1 a 3
Amplitud media (m)	3.8	5.8
Amplitud máxima (m)	7.5	8.7
Potencia canal (MW)	182	6146
Potencia canal x unidad de longitud (MW/km)	11	904

Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 5. Curva de potencia típica par un dispositivo hipotético de 300 kW.



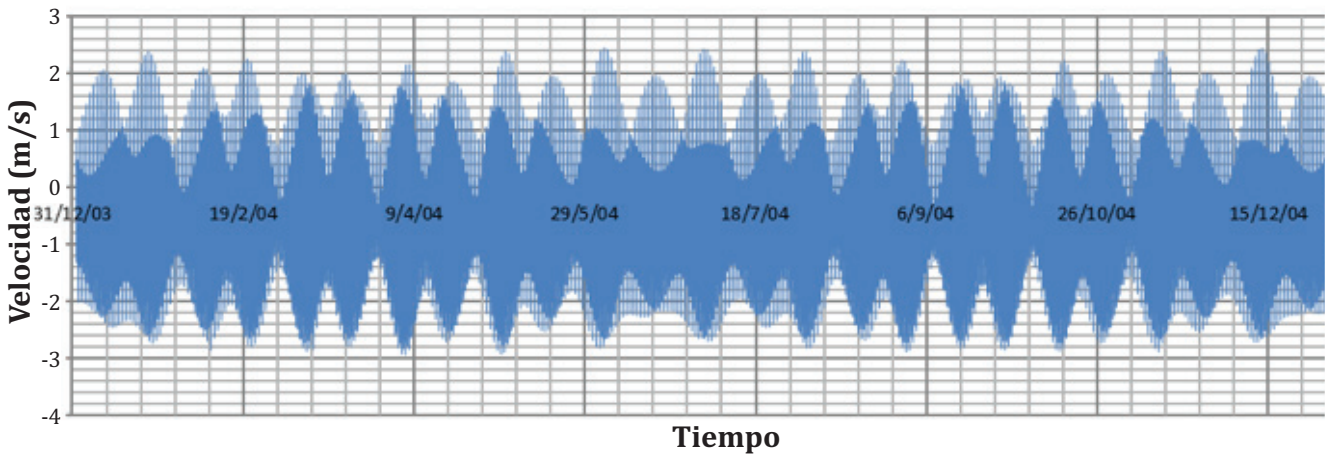
Fuente: Elaboración de los autores.

Algunos límites operacionales característicos pueden obtenerse de la figura: la velocidad de 'arranque', *cut-in*, que marca el límite inferior para la producción de potencia, la velocidad nominal, *Vrated*, en donde la potencia se mantiene constante y alcanza su valor nominal, y la velocidad de 'frenado', *cut-off*, que marca el límite superior de producción energética, para velocidades mayores, la turbina deja de generar, de acuerdo a los límites de funcionamiento del generador.

A su vez, la potencia cinética disponible en una corriente tiene una variación temporal corres-

pondiente a la variación temporal de la velocidad de flujo. Esta intensidad describe un perfil característico de regímenes mareales, que sigue una variación casi cíclica inducida por el movimiento periódico de las mareas. En el caso de regímenes semi-diurnos, puede observarse un patrón típico de cuatro picos diarios con cuatro inversiones de flujo aproximadamente. La Figura 6 muestra la variación anual típica de un régimen semidiurno de mareas, extraída de información disponible para un sitio particular, (para más información consultar Coiro et al, 2019).

Figura 6. Variación anual típica de velocidad de corriente en un sitio con régimen mareal semidiurno.



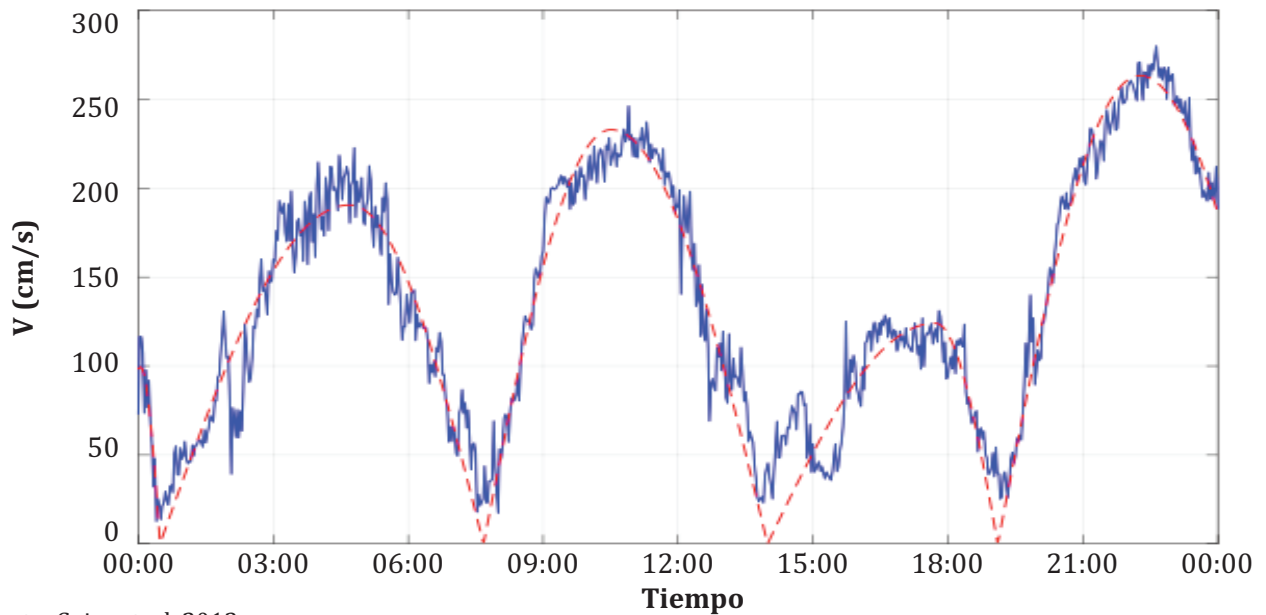
Fuente: Coiro et. al. 2019.

La figura muestra claramente una secuencia de picos múltiples, crecientes y decrecientes a lo largo de un año, causado principalmente por efectos astronómicos. En la Figura 7 se pueden observar datos de velocidad de corriente experimentales en una escala temporal menor, diaria en particular, donde el patrón periódico de múltiples picos, en este caso cuatro picos en un día, es evidente.

En la misma figura puede observarse un patrón diario de velocidades, modelado con funciones

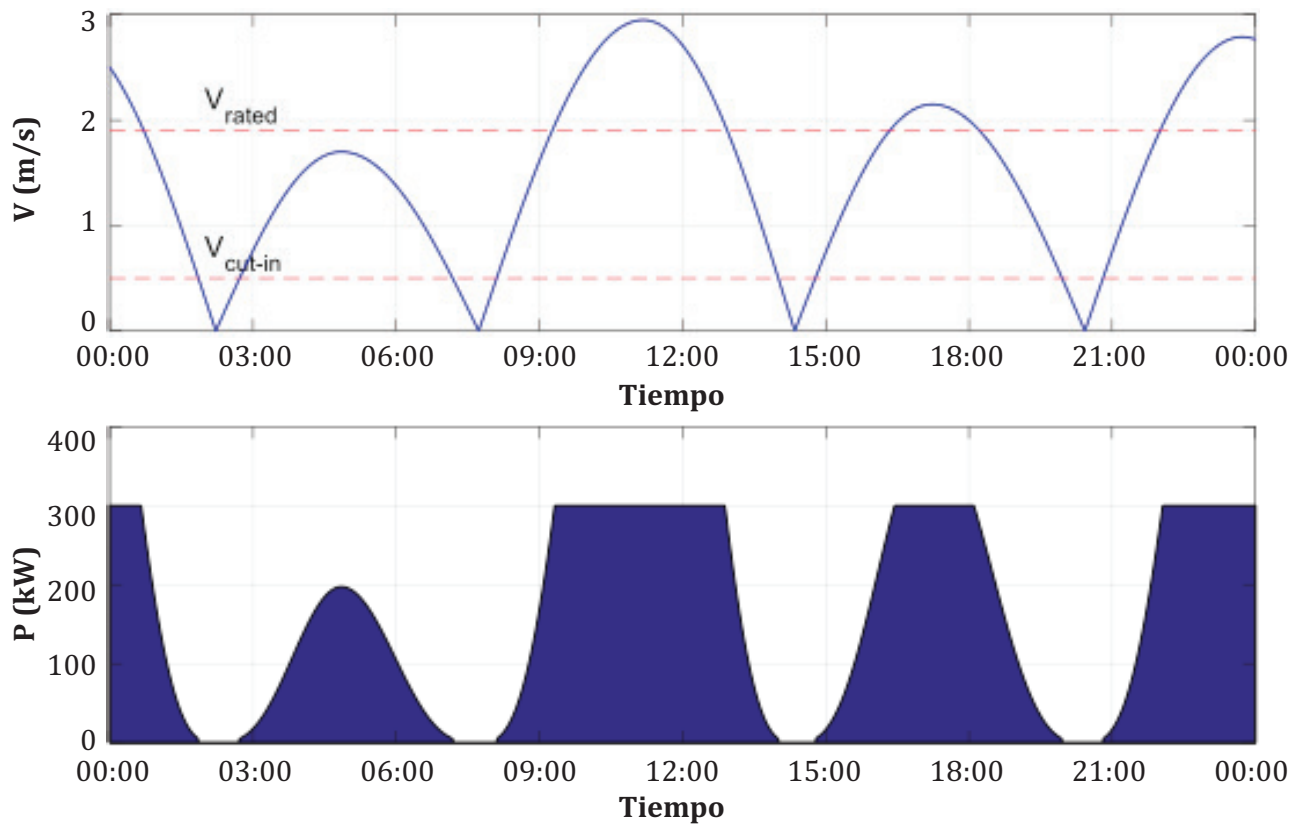
analíticas, y la salida de potencia de una turbina con una curva de potencia según la Figura 5. A valores inferiores de *cut-in* la generación de energía es cero, mientras que, a valores superiores de velocidad por encima de la nominal, la potencia está limitada por el máximo de potencia del generador. A intensidad de flujo mayor al *cut-out*, la turbina es frenada y no hay generación de potencia. La cantidad de energía extraíble puede obtenerse integrando la curva de potencia en el tiempo para un periodo de interés.

Figura 7. Variación diaria típica de velocidad de corriente para un sitio con régimen mareal semidiurno (valores medidos en un día en el Estrecho de Messina).



Fuente: Coiro et. al. 2013

Figura 8. Variación diaria de velocidad en un sitio con régimen semidiurno y una turbina con una curva de potencia como la de la Figura 4.



Fuente: Elaboración de los autores.

CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se han descripto las características generales del fenómeno de las mareas en el litoral chubutense y se ha realizado además un análisis preliminar de algunos sitios para un potencial aprovechamiento energético de las corrientes de mareas asociadas. Se considera el estudio de factibilidad de generación de energía cinética de mareas.

Si bien Chubut no posee el elevado potencial energético que se observa en el litoral de la Provincia de Santa Cruz, presenta una zona de interés, como la boca del Golfo San José, donde se registran altas velocidades de corrientes de mareas, que superan ampliamente las necesarias para generar energía eléctrica mediante turbinas hidrocinéticas.

En este trabajo para una estimación preliminar del recurso se utilizó el relevamiento de datos históricos del SHN para el litoral atlántico argentino y la batimetría obtenida de cartas náuticas. En la boca del golfo San José se presentan los más altos valores de potencia debido a altas velocidades de flujo y a una gran depresión en el centro de la boca. En el golfo Nuevo la estimación de potencia arroja un

resultado menor debido a una corriente inferior, una profundidad menor y un mayor ancho de boca. La desembocadura del Río Chubut cuenta con poca profundidad para la instalación de turbinas y, además, no se poseen aún mediciones de velocidad realizadas en forma sistemática.

Para obtener un estudio completo de los sitios examinados será necesario disponer de perfiles de corrientes en ciclos completos de mareas, así como la batimetría completa de la zona para evaluar la variabilidad espacial y temporal del fenómeno. Además, será imprescindible hacer un estudio de impacto ambiental de los dispositivos de producción energética, siguiendo las normativas marcadas por la provincia de Chubut, y confeccionar un plan de ordenamiento territorial marítimo, para evitar que el dispositivo interfiera de cualquier modo con la navegación o con la fauna, ya sea como un obstáculo en los canales de tránsito como creando interferencias acústicas entre los animales que utilizan el sonido como medio de comunicación, para encontrar el equilibrio entre la posibilidad de aprovechamiento energético y el cuidado del ecosistema.

REFERENCIAS

Adcock, T. A. A. & Draper, S. (2014). Power extraction from tidal channels – Multiple tidal constituents, compound tides and overtides. *Renewable Energy*, 63(0), 797–806.

Aqua-RET (2012), "Tidal Stream - European Resource Map. www.aquaret.com/indexcd1b.html?option=com_content&view=article&id=112&Itemid=255&lang=en

Catálogo GEMA (2018): Energías del mar 2018 Proyectos, Iniciativas, Instituciones, sobre energías del Mar Argentino, 2° edición. <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/?wpdmpro=gema-catalogo-2da-edicion-noviembre-2018>

Chingotto, M. (2005). Boletín del Centro Naval Número 813 enero/abril de 2006 Recibido: 7.7.2005. www.centronaval.org.ar/boletin/BCN813/813chingotto.pdf

Coiro, D.P. Troise, G. Bizzarrini, N. (2019). Experiences in Developing Tidal Current and Wave Energy Devices for Mediterranean Sea, *Frontiers*.

Coiro, D. P., Troise, G. Ciuffardi, T. Sannino, G. (2013). Tidal current energy resource assessment: The Strait of Messina test case. 213-220. 10.1109/ICCEP.2013.6586992.

Coiro, D.P. Troise, G. Bizzarrini, N. (2019). Experiences in Developing Tidal Current and Wave Energy Devices for Mediterranean Sea, *Frontiers*.

- Contreras, A. Oseguera Chazaro, M. Flores Irigollen, A. (2014), Estimado Grueso de Energía Cinética en la Corrientes Marinas de La Ensenada de la Paz. Departamento Académico de Ingeniería en Pesquerías de la Universidad Autónoma de Baja California Sur Ciencia desde el Occidente | Vol. 1 | Núm. 1 | marzo 2014.
- Dragani, W, Lifschitz, A. Tedesco, C. Tomazin N., Seisdedos G., Veneziano M., Galia F. (2016). Energías Renovables Derivadas del Aprovechamiento de aguas, Vientos y Biomasa. ANCFN (Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. N° 9.
- Elliot, D. (2012). Tidal Power. In G. Boyle (Ed.), Renewable energy - Power for a sustainable future. Oxford University Press, 3° edition.
- Electric Power Research Institute Inc., (EPRI) (2005) - Ocean Tidal and Wave Energy, Renewable Energy Technical Assessment Guide – TAG-RE. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1010489.
- Ministerio de Interior, Obras Públicas y Vivienda. (2018). Cuenca del Rio Chubut. (<https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/65.pdf>).
- OES: Ocean Energy Systems: An International Vision for Ocean Energy VERSION. 2011 <https://www.dutchmarineenergy.com/about-us/downloads/10%20-%20OES%20-%20International%20Vision%20Brochure.pdf>
- Paterlini, M. y Mouzo, F. (2013). Exploración Sísmica del Golfo Norpatagonico San José, Plataforma Continental Argentina, Provincia de Chubut. GEOACTA 38(1): 81-94. ISSN 1852-7744.
- Polo, M. Rodríguez J, Sarmiento, A. (2008). Tidal Current Potential for Energy Generation along the Colombian Coastline. Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. rev.ing. ISSN. 0121-4993. N° 28.
- Renewable Energy Agency, (2014) IRENA (International Renewable Energy Agency): Ocean Energy Report.
- Rivas, A. Ripa, P (1989). Variación Estacional de la Estructura Termo-halina de Golfo Nuevo, Argentina. Geofísica Internacional. Vol. 28.
- SHN: Servicio de Hidrografía Naval. Nautical charts: <http://www.hidro.gov.ar/nautica/cco.asp>.
- USACE. Coastal Engineering Manual. (2002). Washington D.C. U.S. Army Corps of Engineers.
- World Energy Council | World Energy Resources (2016) <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>.