

Evaluación preliminar del recurso energético disponible en el canal de Chacao

Preliminary evaluation of the energy resources available at Chacao channel

Daniel Gajardo¹, Alumno de 6to año
Rodrigo Cienfuegos¹, Profesor Asociado
Maricarmen Guerra², Alumna de doctorado
Cristián Escauriaza¹, Profesor Asistente

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

²Civil and Environmental Engineering, University of Washington

^{*}Autor de correspondencia: racienfu@ing.puc.cl

Daniel Gajardo¹, 6th year student
Rodrigo Cienfuegos¹, Associate Professor
Maricarmen Guerra², Doctoral candidate
Cristián Escauriaza¹, Assistant Professor

¹Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Engineering School, Pontificia Universidad Católica de Chile

²Civil and Environmental Engineering, University of Washington

^{*}Corresponding author: racienfu@ing.puc.cl

RESUMEN

Este artículo desarrolla un modelo numérico unidimensional para simular las condiciones hidrodinámicas y las corrientes de marea en el canal de Chacao, ubicado en la X Región de Chile. El principal objetivo de este estudio es usar esta simulación para evaluar preliminarmente el potencial energético disponible en esta zona, el que puede ser aprovechado mediante dispositivos de extracción de energía marina del tipo turbina. El estudio no se basa en un diseño de turbina en específico, sino que representa estos dispositivos mediante una disminución de la cantidad de movimiento del flujo. Los resultados obtenidos también pueden ser utilizados y comparados con modelos más complejos y contribuyen a tener una mejor comprensión de los fenómenos hidrodinámicos predominantes en el lugar de estudio. Además, se pretende validar este modelo como una herramienta simple para realizar una primera aproximación al recurso energético de zonas con una geografía similar al canal de Chacao. Para lograr lo anterior se utilizó como referencia un modelo desarrollado por Blanchfield et al. [1], validando su aplicación con soluciones analíticas, datos de terreno y casos de estudio. La aplicación del modelo al canal de Chacao entregó que la velocidad media del flujo en condiciones naturales del canal es de $1,85 \text{ m s}^{-1}$, con una velocidad máxima de $2,79 \text{ m s}^{-1}$. En cuanto al potencial energético del lugar, se encontró que este es de aproximadamente 1.075 MW. Este valor disminuye a 468 MW cuando se busca conservar el 90% del caudal que circula naturalmente por el canal.

Palabras clave: Energía marina, energías renovables no convencionales, modelos numéricos.

ABSTRACT

This article develops a one-dimensional numerical model capable of simulating hydrodynamic conditions and tidal currents occurring in the Chacao Channel, located in the X Region of Chile. The main objective of this study is to use this simulation to preliminarily evaluate the tidal energy resource available in this area, which can be extracted through marine energy converters. The study is not carried out for a specific marine energy converter, but represents them as a force acting in the fluid, extracting momentum from it. The results obtained contribute to a better understanding of the hydrodynamics processes present in the study area and can also be compared with more complex models. In addition, the authors intend to validate this model as a simple tool capable of estimating preliminarily the tidal energy potential of sites with similar geographic characteristics to the Chacao Channel. The model developed by Blanchfield et al. [1] was used as a reference, validating its application with analytical solutions, field data and study cases. The application of the model to Chacao Channel resulted in an along channel velocity mean of 1.85 m s^{-1} and a maximum of 2.79 m s^{-1} . Regarding the channel's tidal energy potential, it was found that this location has a resource of approximately 1,075 MW. This value decreases to 468 MW when 90% of the natural flow is conserved.

Keywords: Marine energy, non-conventional renewable energy, numerical models.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el calentamiento global y el medioambiente, además del aumento sostenido de la demanda de energía a nivel mundial, han incentivado la búsqueda y estudio de nuevas tecnologías limpias y sustentables para la generación de electricidad [2]. Actualmente en Chile las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) más desarrolladas son la eólica y la solar, con un 39% y un 21% de la matriz ERNC chilena [3], respectivamente. Sin embargo, la obtención de energía asociada a fenómenos marinos ha emergido como una opción atractiva y viable en el mediano-largo plazo para un desarrollo energético sustentable [4].

El método más común para extraer energía del mar consiste en intervenir fuertemente bahías y zonas costeras, bloqueando el flujo natural del agua para aprovechar la diferencia de altura de agua que generan las **mareas**, lo que hace que esta solución sea inviable en países con fuerte percepción y regulación ambiental. Ejemplos de

1. INTRODUCTION

The growing concern regarding global warming and environmental issues, together with the global demand for sustainable energy, have encouraged the search and study of new sustainable, clean technologies to generate electricity [2]. Currently in Chile, the most developed Non-conventional Renewable Energy (NCRE) sources are wind and solar energy, with a corresponding 39% and 21% of the Chilean NCRE grid [3]. Nevertheless, obtaining energy from marine phenomena has emerged as an attractive and viable mid-to-long term option for the development of a sustainable energy source [4].

The most common method of marine extraction consist of a strong intervention of the bays and coastal areas to block the natural flow of water, in order to harness the difference in water height generated by **tides**. This makes this solution non-viable in countries with strong environmental perception and regulation. Examples of this application can be found in the tidal power plants in La

esta aplicación son las centrales de La Rance, en Francia, y Sihwa Lake, en Corea del Sur. Por lo anterior, hoy en día las principales líneas de investigación en esta área apuntan hacia encontrar dispositivos que puedan extraer energía sin intervenir de manera tan dramática el ambiente natural [5]. Un ejemplo de esto son los prototipos de turbinas ancladas al fondo marino que aprovechan el movimiento del agua para producir electricidad [6].

Cabe destacar que la **hidrodinámica** asociada a estas turbinas aún se encuentra en fase de estudio y, a diferencia de la energía eólica, aún no hay consenso para un diseño óptimo de ellas [7, 8, 9]. Sin embargo, ya se pueden encontrar evaluaciones de su desempeño en diferentes zonas del mundo, como lo realizado por Sutherland et al. [10] en el estrecho de Johnstone, Canadá o por Blanchfield et al. [11] en el archipiélago Haida Gwaii, Canadá. En este artículo no se evaluará la energía que podría producir algún prototipo de turbina en particular, sino que se calculará el potencial energético asociado a un sitio de estudio.

Considerando lo anterior, Chile cuenta con una geomorfología privilegiada para la investigación y desarrollo de **energía mareomotriz** y de **corrientes mareales** [9]. En particular, la zona de estudio de este artículo presenta características especialmente favorables para estas tecnologías debido a sus altas velocidades de corriente, aguas no tan profundas, y cercanía a la principal red de energía eléctrica de Chile, el Sistema Interconectado Central [4, 12]. Por estas razones el canal de Chacao es la zona con mayor prospecto para un posible desarrollo de la energía marina nacional, en particular para proyectos de corriente [13].

El canal de Chacao se encuentra delimitado al norte por el continente Americano, al oeste por el Océano Pacífico, al sur por la isla de Chiloé y al este por el golfo de Ancud. Además, la zona es parte del complejo sistema de fiordos, canales, islas y golfos que constituyen el denominado Mar Interior de Chile (CIS por sus siglas en inglés, ver Figura 1). El CIS presenta

Rance in France and Sihwa Lake in South Korea. Because of this reason, recent research in this area focuses on devices capable of extracting energy without interfering with the natural environment in such a dramatic manner [5]. An example of this are marine energy converters anchored to the sea bottom that use tidal currents to produce electricity, analogous to wind turbines [6].

It is important to mention that the **hydrodynamics** associated with these marine energy converters are still in the study phase, and, in contrast to wind energy, there is no current consensus regarding their optimal design [7,8,9]. Nevertheless, performance evaluations of these marine energy converters can be already be found in different parts of the world, such as the one by Sutherland et al. [10] at the Johnstone Strait in Canada, or by Blanchfield et al. [11] at Haida Gwaii archipelago in Canada. In this article, the energy that a particular marine energy converter prototype could produce will not be evaluated; instead, the energy potential associated with the area of study will be calculated.

Considering the latter, Chile has a privileged geomorphology in terms of research and development of **tidal power** and of **tidal currents** [9]. Particularly, the zone of study of this article presents especially favorable qualities for such technologies, due to the high velocity of its currents, its shallow waters, and its proximity to the Chilean power grid, the Central Interconnected System [4, 12]. For these reasons, the Chacao Channel is the area with the best prospect for the development of national marine energy, particularly for in-stream projects [13].

The Chacao Channel is limited to the north by the South American continent, to the west by the Pacific Ocean, to the south by Chiloé Island, and to the east by the Ancud Gulf. Additionally, this area is part of a complex system of fjords, channels, islands, and gulfs that comprise what is known as Chilean Inland Sea or CIS (See Figure 1). There is a strong interaction among the different elements that comprise the CIS, and even

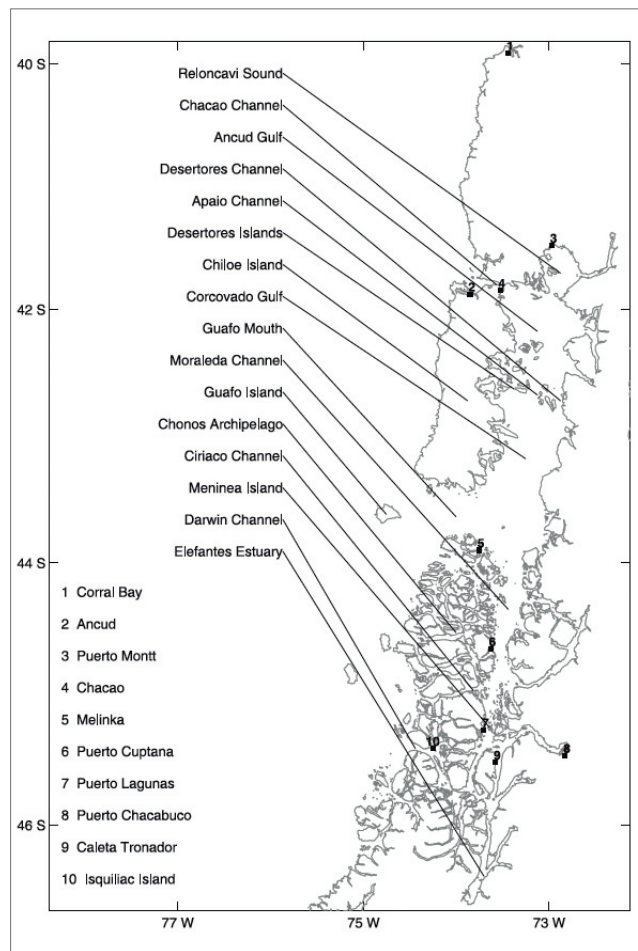


Figura 1. Elementos principales del Mar Interior de Chile [14].

Figure 1. Main elements of Chilean Internal Sea [14].

una fuerte interacción entre los distintos elementos que lo componen, generándose incluso fenómenos de resonancia y amplificación de ondas de mareas en ciertas zonas de él [14].

El objetivo principal de esta investigación es implementar un modelo unidimensional que permita realizar una aproximación simplificada al potencial energético del canal de Chacao. Esto posibilita evaluar la extracción de potencial energético en esta zona mediante dispositivos de energía marina. Además, la simulación es una herramienta de fácil uso para obtener magnitudes para las variables que dominan el problema, como la velocidad del agua y el caudal que circula a través del canal.

Por otra parte, como objetivo secundario se propone la validación del modelo desarrollado en este artículo mediante la comparación con datos disponibles de la zona y de otros modelos más complejos. Esto permite validar la herramienta para los análisis preliminares mencionados anteriormente. Incluso, resultados de este modelo podrían ser usados como valores iniciales y puntos de comparación con modelos más avanzados.

2. METODOLOGÍA

Se implementó en la plataforma computacional *MATLAB*[®] un modelo numérico capaz de predecir el flujo a través de un canal de sección variable que conecta una bahía con el mar abierto. Este modelo se basó en el modelo elaborado por Blanchfield et al. [1]. La variable forzante que se utiliza corresponde a una serie temporal de marea en el océano. A partir de esta el modelo resuelve simultáneamente las ecuaciones unidimensionales de cantidad de movimiento y continuidad y se obtiene como resultado las series de tiempo para la altura de agua en la bahía y de caudal en el canal. Estas variables serán utilizadas posteriormente para estimar la potencia disponible en el sistema.

El sistema adimensional de ecuaciones que representa lo descrito anteriormente es el siguiente:

$$\frac{dQ^*}{dt^*} = \zeta_o^* - \zeta_{Bahía}^* - \lambda_1^* Q^* |Q^*|^{n_1-1} - \lambda_2^* Q^* |Q^*|^{n_2-1} - \frac{ga}{2(c\omega E_e)^2} Q^* |Q^*| \quad (1)$$

$$\frac{d\zeta_{Bahía}^*}{dt^*} = \beta Q^* \quad (2)$$

tidal wave resonance and amplification can occur in some of its areas [14].

The main goal of this research is to implement a one-dimensional model to develop a simplified approach to the tidal energy potential of the Chacao Channel. This makes possible the evaluation of the potential of tidal energy extraction in this area through marine energy converters. Furthermore, the simulation is a user-friendly tool to obtain magnitudes for the variables of the problem, such as velocity and flowrate of the water that circulates through the channel.

On the other hand, the secondary objective proposed is the validation of the model developed in this article through the comparison of available data for the area and more complex models. This allows for the validation of the tool for the preliminary analysis mentioned earlier. The results of this model could even be used as initial values and reference points for more complex models.

2. METHODOLOGY

The authors implemented a numerical model capable of predicting flow through variable streamwise section channels connecting a bay with the open sea. This model developed in *MATLAB*[®] was based on the previous work done by Blanchfield et al. [1]. The forcing variable used corresponds to a tidal time series in the ocean. Using this variable, the model simultaneously resolves the one-dimensional equations of momentum and continuity, obtaining as a result a time series for the bay water height and the channel flowrate. These variables will be used later to estimate the power available in the system.

The dimensionless equation system that represents what was previously described is the following:

donde la forzante de marea, la altura de agua en la bahía y el caudal en el canal son representados por ζ_o^* , $\zeta_{Bahía}^*$ y Q^* , respectivamente. La forzante de marea se representó por una función sinusoidal del tipo $\zeta_o^*(t)=\cos(\omega)$, donde ω representa la frecuencia angular de la marea.

Los parámetros λ_1^* y λ_2^* representan el **arrastre** que es aplicado al flujo por las turbinas y por el fondo, respectivamente. Resolviendo el sistema para distintos valores de λ_1^* se pueden obtener las condiciones de flujo para distintos escenarios de turbinas en el canal. Esto permite encontrar un punto óptimo de arrastre de turbinas para el cual se maximiza la potencia generada en el canal. Más allá de este punto los dispositivos frenan el flujo, disminuyendo el potencial energético del lugar en estudio [1]. Cabe destacar que los coeficientes n_1 y n_2 representan la relación entre el arrastre y el flujo. En este estudio se consideró que esta influencia es cuadrática ($n_1 = n_2 = 2$).

El valor de λ_2^* se puede obtener mediante

$$\lambda_2^* = C_d \frac{ga}{(c\omega)^2} \int (hE^2)^{-1} dx \quad (3)$$

donde C_d es el coeficiente de arrastre de fondo, g es la aceleración de gravedad, a es la amplitud de la marea forzante, ω es la frecuencia angular de esta marea, h y E son la profundidad máxima y el área transversal de una sección transversal del canal, y c es el coeficiente de geometría del canal. Este último se obtiene a partir de

$$c = \int E^{-1} dx \quad (4)$$

En la ecuación de continuidad (Ecuación 2), el parámetro β es el coeficiente de geometría de la bahía, y se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{g}{cA\omega^2} \quad (5)$$

donde c es el coeficiente g de geometría del canal, A es la aceleración de gravedad, ω es el área superficial de la bahía y es la frecuencia angular de la marea forzante. La resolución numérica de este sistema de ecuaciones se realizó utilizando el método de Runge-Kutta de cuarto orden.

Tras la aplicación computacional del modelo, se validó su implementación mediante soluciones analíticas y teóricas [1] y mediante la comparación de resultados con la aplicación de un modelo similar en un canal ubicado en el archipiélago Haida Gwaii, Columbia Británica, Canadá [11]. Los resultados obtenidos fueron muy similares, confirmando la validez de la implementación realizada. Por ejemplo, para el caso canadiense, los resultados obtenidos

where the tide forcing, the height of water in the bay and the flowrate in the channel are represented by ζ_o^* , $\zeta_{Bahía}^*$ and Q^* , respectively. The tide forcing was represented by a sinusoidal function type $\zeta_o^*(t)=\cos(\omega)$, where ω refers to the tidal frequency.

The parameters λ_1^* and λ_2^* represent the **drag** that is applied to the flow by the marine energy converters and by the seabed, respectively. By solving the system for different values of λ_1^* , flow conditions for different scenarios of marine energy converters can be obtained. This allows the finding of an optimal drag point for this devices, at which the power generated by the channel can be maximized. Beyond this point, putting additional devices would block the flow, reducing the tidal energy potential of the studied area [1]. It is important to highlight that the coefficients n_1 and n_2 represent the relationship between the drag and the flow. In this study, it was considered that this influence is quadratic $n(1) = n(2) = 2$

The value λ_2^* can be obtained through

$$\lambda_2^* = C_d \frac{ga}{(c\omega)^2} \int (hE^2)^{-1} dx \quad (3)$$

where C_d is the bottom drag coefficient, g is gravity acceleration, a is the amplitude for the forcing tide, ω is the angular frequency of said tide, h and E are the maximum depth and the cross-section area of a cross-section of the channel, and c is the geometry coefficient of the channel. The latter is obtained from

$$c = \int E^{-1} dx \quad (4)$$

In the continuity equation (Equation no. 2), parameter β is the geometry coefficient of the bay, and it is obtained using the following expression:

$$\beta = \frac{g}{cA\omega^2} \quad (5)$$

where c is the geometry coefficient of the channel, g is the acceleration of gravity, A is the area of the bay, and ω is the tidal frequency of the forcing tide. The numerical resolution of this equation system was performed using the Fourth Order Runge-Kutta method.

The implemented model was validated through analytical and theoretical solutions [1], and through the comparison of the results with the application of a similar model in a channel located in the Haida Gwaii archipelago in British Columbia, Canada [11]. The results obtained were very similar, confirming the validity of the implementation performed. As an example, for the Canadian case, the results obtained are within 3% to those obtained in [11]

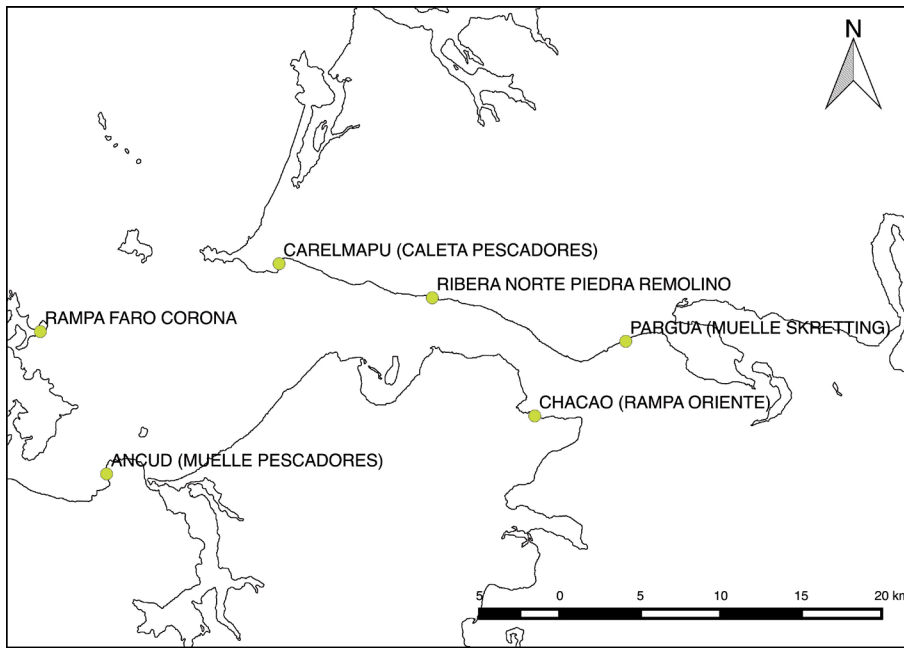


Figura 2. Mareógrafos disponibles en el canal de Chacao [3]. Se utilizó como marea forzante la componente M2 según lo reportado por el mareógrafo de Carelmapu.

Figure 2. Available tidal gauges in the Chacao Channel [3]. The component M2 was used as the forcing tide according to what was reported by the tidal gauge of Carelmapu.

tienen variaciones menores a un 3% en comparación a los datos obtenidos en [11]. La importancia de esta validación es que permite concluir que el programa desarrollado fue correcto, ya que se obtuvieron tanto las soluciones analíticas esperadas, como resultados similares para otros casos de estudio. Una vez hecha esta validación se tiene la seguridad que el programa es capaz de solucionar correctamente el problema en estudio.

Posteriormente a la validación, se procedió a implementar el programa al canal de Chacao. En primer lugar, se utilizaron datos del Instituto Nacional de Hidráulica (INH) para simular la marea forzante del océano. En particular, se escogió el **mareógrafo** de Carelmapu (ver Figura 2) debido a su cercanía con el inicio del canal. Además, si bien las mareas se conforman por variados componentes, cada uno con una amplitud y frecuencia, se optó por la componente denominada M2 debido a que sus mayores amplitudes la hacen la más energética. Según lo reportado por el INH [15] esta componente tiene una frecuencia angular del orden de $\omega = 1,405 \times 10^{-4}$ y una amplitud de $a = 0,9419$ m en el mareógrafo escogido [3].

En segundo lugar, para aplicar el modelo al canal de Chacao, se asumió que el golfo de Ancud representa la bahía que es conectada al océano a través de un canal. Si bien la realidad del Mar Interior de Chile es compleja y también pueden ser importantes los fenómenos de marea en el seno de Reloncaví y en el golfo del Corcovado (ver Figura 1) [14], se utilizará este supuesto considerando los alcances del presente informe. Para obtener la superficie del golfo de Ancud se procedió a utilizar el *software* de información geográfica QGIS, en el que se definió la frontera de esa bahía según lo mostrado en la Figura 3. Según esta delimitación, se obtuvo una superficie de aproximadamente 3073 km².

which is considered adequate. The importance of this validation is that it leads to the conclusion that the program developed was correct, as both the analytical solutions obtained and the similar results to other case studies turned out as expected. Once this validation is done, there is certainty that the program is capable of resolving correctly the problem under study.

After the validation, the program was implemented in the Chacao channel. First, data from the National Institute of Hydraulics (INH) was used to simulate the forcing tide of the ocean. Particularly, the **tidal gauge** of Carelmapu (see Figure 2) was chosen due to its proximity to the entrance to the channel from the ocean. Also, although tides are formed by different components, each one with its own amplitude and frequency, the component denominated M2 was chosen because its greater amplitudes make it more energetic. According to the INH's reports [4] this component has an angular frequency order of $\omega 1.405 \times 10^{-4}$ rad/s and an amplitude of $a = 0.9419$ m in the chosen tidal gauge [3].

Second, in order to apply the model to the Chacao Channel, it was assumed that the Ancud gulf represented the bay connected to the ocean through a channel. Although the reality is that the Chilean Inland Sea is complex, and the tides of the Reloncaví Sound and the Corcovado gulf (see Figure 1) [14] may also be important phenomena, this will be assumed according to the scope of the present report. The geographic information software QGIS was used to obtain the area of the Ancud gulf, in which the limits of said bay were defined as shown in Figure 3. According to this demarcation, an area of approximately 3073 km² was obtained.

Figura 3. Superficie utilizada para el golfo de Ancud. Al utilizar esta área se ignora la influencia del canal sobre los cuerpos de agua ubicados al norte y al sur del golfo. Modelos más complejos podrían incorporar esto al problema.

Figure 3. Area used for the Ancud gulf. By using this area, the influence of the channel over bodies of water located to the north and south of the gulf can be ignored. More complex models could incorporate this to the problem.



Para poder calcular los parámetros restantes necesarios para utilizar el modelo, se procedió en primer lugar a discretizar el canal de Chacao en perfiles transversales al flujo. Esto permite obtener valores representativos como el área de cada perfil y la profundidad de agua media, los que serán utilizados para la obtención de las variables físicas del problema.

Con el uso del *software* de información geográfica *QGIS* se definieron los perfiles según lo dispuesto en la Figura 4. La zona indicada se seleccionó debido a que los estudios existentes muestran que es la de mayor potencial energético, además de ser una región donde se poseen buenos datos de marea y de **batimetría** (ver Figura 5), fundamentales para los cálculos necesarios [12, 15, 16].

In order to calculate the remaining parameters of the model, the Chacao Channel was first discretized in cross-section flow profiles. This makes possible to obtain representative values such as the area of each profile and the depth of the measured water, which will be used to obtain the physical variables of the problem.

With the use of geographical information software *QGIS*, profiles were defined according to the data in Figure (4). The indicated area was selected because existing studies show it has the greatest tidal energy potential, as well as for being a region that already has good tide and of **bathymetry** data (see Figure 5), which are essential to perform the necessary calculations [12, 15, 16].

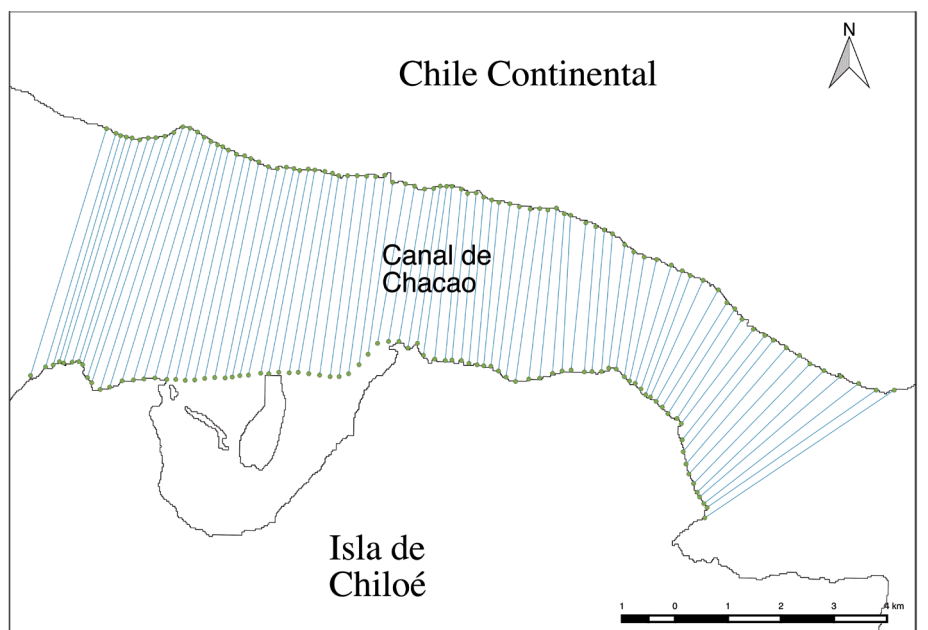


Figura 4. Discretización realizada en el canal de Chacao. Se utilizaron 86 perfiles.

Figure 4. Discretization of the Chacao Channel. 86 profiles were used.

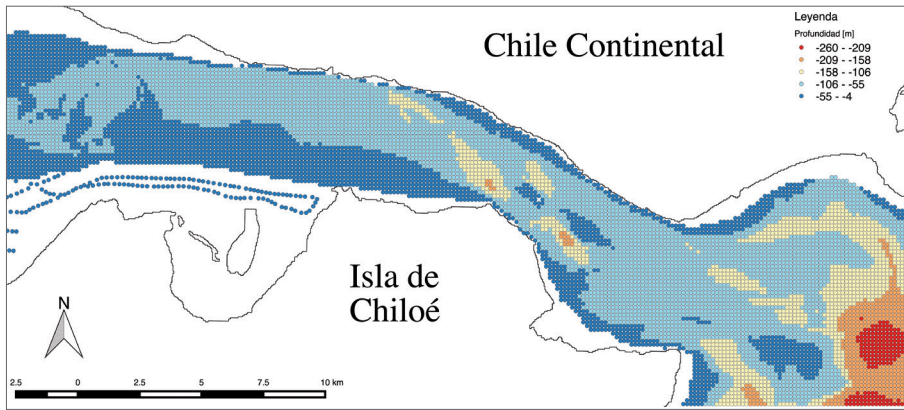


Figura 5. Batimetría del canal de Chacao, con precisión de 100 m.

Figure 5. Bathymetry of the Chacao Channel, with 100 m precision.

Una vez determinadas las coordenadas de los extremos de cada perfil, es posible interpolar la información de batimetría disponible para así obtener los perfiles transversales del canal. Esto permite calcular aproximadamente el área transversal de cada perfil, su profundidad media, y obtener los parámetros necesarios para aplicar el modelo computacional al canal de Chacao.

Una vez que se conoce el caudal que circula a través del canal y el área transversal de cada perfil es posible obtener las velocidades a lo largo del canal aplicando las ecuaciones de continuidad y flujo uniforme explicadas en la sección de Principio Científico. Particularmente, para la velocidad máxima se dividió el mayor caudal simulado por la mínima área transversal. En el caso de la velocidad media, esta se obtuvo promediando la velocidad máxima asociada a cada valor de caudal obtenido, es decir, se dividió la serie de tiempo de caudales por el área mínima y se promedió el resultado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras realizar lo indicado en la sección anterior, se procedió a correr el modelo con los datos que se encuentran resumidos en la Tabla 1. Los parámetros de marea fueron obtenidos según lo reportado por el INH [15]. Las áreas de la bahía y áreas transversales se obtuvieron utilizando la batimetría del canal y el programa QGIS. Los parámetros c , β y λ_2^* se calcularon según las ecuaciones presentadas en la sección de metodología. En cuanto el peso específico ρ , se utilizó un valor característico para el agua de mar [1]. Para una mayor profundización sobre el significado de cada una de las variables mostradas en la Tabla 1 se sugiere revisar la sección de Principio Científico o el modelo que inspira este informe [1].

Para las condiciones naturales del canal se obtuvieron valores de velocidad máxima media en el canal de $\bar{u} = 1,85 \text{ m s}^{-1}$ y una velocidad máxima de $u_{max} = 2,79 \text{ m s}^{-1}$. Estos resultados tienen menos de un 3% de variación respecto a los datos medidos en el canal [15, 16] y obtenidos en simulaciones bidimensionales para esa zona [12]. Al igual que en [12, 15 y 16], el lugar de máxima velocidad corresponde a la zona de Roca Remolinos, donde el canal es más angosto (ver Figura 2).

Once the coordinates for each profile's edges are determined, it is possible to interpolate available bathymetry information to obtain the cross-section profiles of the channel. This makes possible to calculate the approximate cross-section area of each profile, its mean depth, and the necessary parameters to apply the computer model in the Chacao channel.

Once the flowrate that circulates through the channel and the cross-section area of each profile is known, streamwise velocities are obtained by applying the continuity and uniform flow equations explained in the Scientific Principle section. Particularly, to obtain the maximum velocity, the largest simulated flowrate was divided by the minimum cross-section area. In the case of the mean velocity, it was obtained by averaging maximum velocity associated with each flowrate obtained, that is, the flow time series was divided by the minimum area and the result was averaged.

3. RESULTS AND DISCUSSION

After performing what was indicated in the previous section, the model was run with all the data summarized in Table 1. The tide parameters were obtained according to the INH reports [15]. The area of the bay and the cross-section area were obtained by using the channel's bathymetry and the QGIS program. Parameters c , β and λ_2^* were calculated according to the equations presented in the Methodology section. In terms of specific weight ρ , a characteristic value assigned to seawater was used [1]. For a deeper understanding of the significance of each of the variables shown in Table 1, it is advisable to review the Scientific Principle section or the model that inspires this report [1].

The mean of the maximum velocity values obtained for the channel in its natural conditions was $\bar{u} = 1.85 \text{ m s}^{-1}$ and a maximum velocity of $u_{max} = 2.79 \text{ m s}^{-1}$. These results have less than a 3% variation with respect to the data measured in the channel [15, 16] and to those obtained in bi-dimensional simulations for that area [12]. As in [12, 15 y 16], the place where maximum velocity occurs corresponds to the area of Roca Remolinos, where the channel is narrow (see Figure 2).

Table 1.- Data used for the Chacao Channel.

Parameter	Description	Value	Unit
α	Tide Amplitude	0.9419	m
ω	Tide frequency	1.405×10^{-4}	s^{-1}
A	Bay area	3.073	km^2
g	Gravity acceleration	9.81	$m s^{-2}$
ρ	Specific water weight	1.025	$kg m^{-3}$
E_e	Area of the channel's outlet	277,275	m^2
E_{min}	Minimum cross-section area	195,504	m^2
c	Channel Geometry coefficient	0.699	m^{-1}
β	Bay geometry coefficient	2.3134	-
λ_2^*	Bottom drag parameter	1,5618	-

Por otro lado, tal como lo ilustra la Figura 6, el modelo es capaz de representar correctamente el desfase de las mareas entre el océano y la bahía en sus condiciones naturales. En el canal se observa un desfase de aproximadamente una hora entre la marea alta al inicio y al final del canal, fenómeno que logró ser representado por el modelo. Tal como lo medido por el INH [15], se amplifica la marea en la bahía, obteniéndose alturas de marea mayores en el extremo oriental del canal, comparadas con el extremo occidental. Esta amplitud de onda se encuentra dentro de un 25% de variación (a lo más 40 cm) con respecto a los mareógrafos representativos del canal y el golfo de Ancud: Piedra Remolinos, Pargua y Chacao (ver Figura 2).

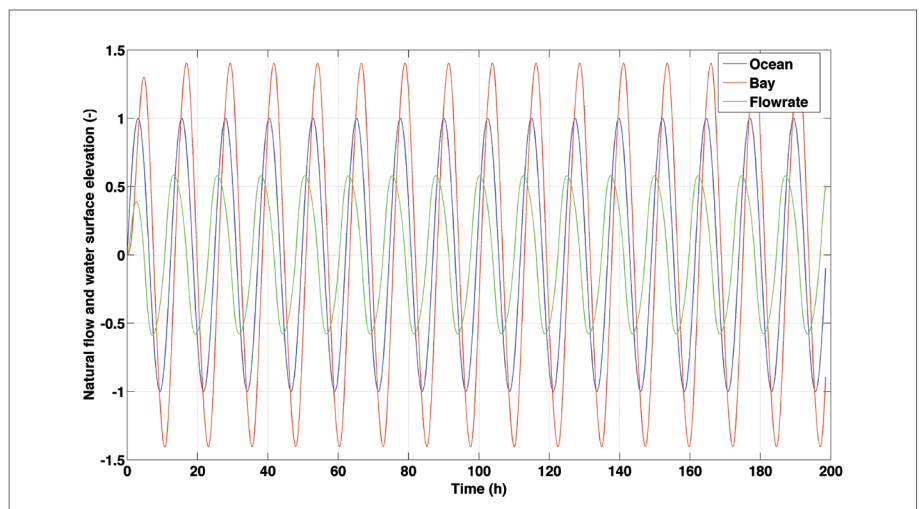
En cuanto a la potencia disponible en el canal, tal como era de esperar, se encontró que existe un punto óptimo de generación de energía. Después de este punto la instalación de más turbinas disminuye el flujo, reduciendo la disponibilidad energética del canal (ver Figura 7). Este punto óptimo corresponde a un parámetro de arrastre de turbinas de $\lambda_1^* = 7$.

On the other hand, as shown in Figure 6, the model is capable of correctly representing the tide gap between the ocean and the bay in its natural conditions. A delay of approximately an hour is observed in the channel between high tide at the beginning and at the end of the channel, phenomenon that the model was able to represent. As measured by the INH [15], the bay tide is amplified, obtaining a higher tide height at the eastern extreme of the channel, in comparison to its western extreme. This amplitude is within a 25% variation (40 cm at most) with respect to the representative tidal gauges for the channel and the Ancud gulf: Piedra Remolinos, Pargua and Chacao (see Figure 2).

With regards to power available in the channel an existing optimal point of energy generation was found as expected. The installation of marine energy converters after this point reduces the flow, thus reducing the energy availability of the channel (see Figure 7). This optimal point corresponds to a marine energy converter drag parameter of $\lambda_1^* = 7$.

Figura 6. Resultados para el canal de Chacao sin turbinas. En azul se aprecia la marea forzante. Se observa una buena representación del desfase y la amplificación con la marea en la bahía, en rojo. En verde se aprecia el caudal generado.

Figure 6. Results for the Chacao Channel without marine energy converters. The forcing tide is appreciated in blue. A good representation of the gap and the amplification with the tide of the bay is observed, in red. The flowrate generated can be appreciated in green.



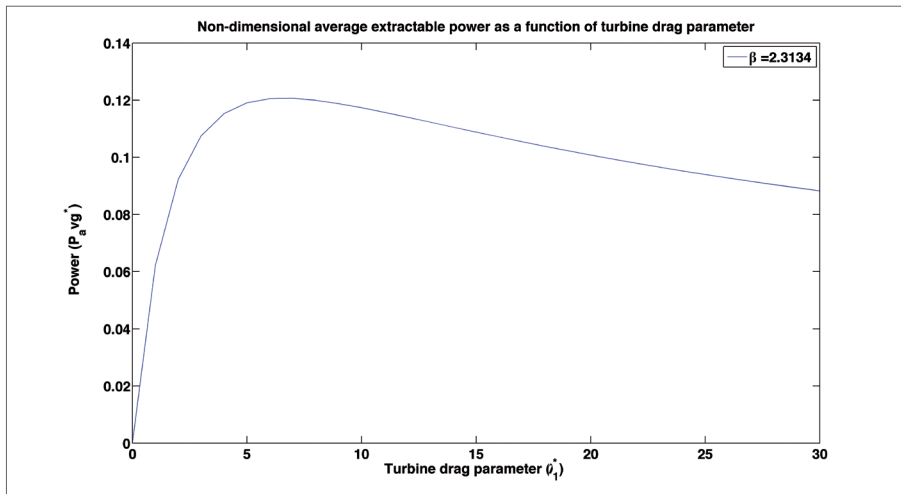


Figura 7. Potencia simulada para el canal de Chacao. Se obtiene una curva que sigue la forma esperada, con un incremento inicial de la potencia a medida que se aumenta la influencia de las turbinas, seguido de un punto óptimo de generación y una posterior caída de la potencia disponible.

Figure 7. Simulated power for the Chacao Channel. A curve that follows the expected form is obtained, with an initial power increment as the influence of the marine energy converters increases, followed by an optimal point of generation and subsequent decline of available power.

En el punto óptimo del problema se encontró un valor para el potencial energético simulado de $(P_{avg})_{max} \approx 1.075$ MW. Este resultado se encuentra dentro de los rangos esperados según la información disponible y simulada para el canal [12, 15, 16]. Es importante mencionar que en este escenario de máxima generación, el modelo arrojó una disminución de caudal de un 44,59%.

Con el interés de evaluar el potencial energético para una situación con consideraciones ambientales en la cual se conserva el 90% del caudal inicial, se encontró que esta restricción se logra con $\lambda_1^* = 0,787$. Esto equivale a una situación de $(P_{avg})_{max} \approx 468$ MW, donde las velocidades medias y máximas disminuyen a $\bar{u} = 1,695$ m s⁻¹ y $u_{max} = 2,508$ m s⁻¹, respectivamente.

Además, es posible ampliar el modelo para que este incorpore más componentes de marea en el océano, y no solamente el componente dominante de la marea M2. En esta misma línea, para comprender de mejor manera el complejo sistema hidráulico presente en los alrededores del canal de Chacao, es necesario estudiar el sistema contemplando un mayor número de sus elementos. Esto implicaría considerar que el golfo de Ancud está conectado al sur con el golfo de Corvocado y al norte con el seno de Reloncaví. Además, implicaría estudiar la influencia de la zona sur del Mar Interior de Chile sobre las corrientes presentes en el canal de Chacao.

Por último, actualmente se encuentra en construcción un puente que cruza el canal de Chacao. Este afectará de alguna manera el flujo de agua a través del canal, con implicancias directas sobre una posible instalación de turbinas en esta zona. Por lo anterior, es necesario analizar cómo es posible compatibilizar un futuro de generación eléctrica en el canal estudiado con la construcción de esta obra, y además con el desarrollo de flora y fauna local, la actividad turística y la actividad económica de la zona.

At the optimal point of the problem, a value for the simulated tidal energetic potential was found at $(P_{avg})_{max} \approx 1,075$ MW. This result is within the expected range according to the information available and simulated for the channel [12, 15, 16]. It is important to mention that in this maximum generation scenario, the model showed a flowrate reduction of 44.59%.

In order to evaluate the tidal energy potential for a situation with environmental considerations in which 90% of the initial flowrate is conserved, it was determined that this restriction is achieved at $\lambda_1^* = 0.787$. This is the equivalent to the situation of $(P_{avg})_{max} \approx 468$ MW, where mean and maximum velocities decrease to $\bar{u} = 1.695$ m s⁻¹ and $u_{max} = 2.508$ m s⁻¹, respectively.

The model could be expanded to incorporate additional ocean tide components, and not only the dominant tide component M2. Similarly, in order to reach a better understanding of the complex hydraulic system surrounding the Chacao Channel, the system needs to be studied taking into consideration a higher number of elements. This means considering that the Ancud Gulf is connected to the south with the Concorvado Gulf and to the north with the Reloncaví Sound. In addition, it would involve studying the influence of the southern area of the Chilean Internal Sea over the currents present in the Chacao Channel.

Finally, a bridge crossing the Chacao channel is currently under construction. This will somehow affect the water flow through the channel, with direct implications over possible the installation of marine energy converters in the area. Because of this, a future of electric generation in the studied channel needs to be analyzed as to how to make it compatible with this structure, as well as to local flora and fauna, and to the economic and tourism activities of the area.

4. CONCLUSIONES

Considerando la creciente problemática medioambiental y la necesidad de nuevas formas de generación de energía, se buscó desarrollar un modelo unidimensional para evaluar la potencia disponible en el canal de Chacao, X Región, Chile. Este lugar es relevante debido a sus favorables condiciones hidrodinámicas para la generación de energía, además de tener una ubicación privilegiada.

En primer lugar, se concluyó que el modelo desarrollado es una implementación correcta de la teoría desarrollada por Blanchfield et al. [1]. El proceso de validación, en el cual se compararon los resultados del modelo con casos teóricos, analíticos y prácticos (Haida Gwaii, Canadá), permitió determinar que se programó un modelo que es capaz de predecir la potencia disponible en un canal que conecta una bahía con el océano.

Sin embargo, cuando se evalúa este canal en condiciones cercanas a su estado natural sin turbinas o en escenarios donde los fenómenos de resonancia con la bahía son importantes, se obtienen resultados que varían con respecto a la teoría, generalmente sobreestimando el caudal natural. Cabe destacar que estos errores se disipan cuando el arrastre sobre el flujo es mayor, lo que implica que las predicciones de potencia son correctas.

En segundo lugar, tras realizar la aplicación al canal de Chacao, se obtuvieron magnitudes esperadas y errores tolerables (menores a un 5%) para la velocidad media, la velocidad máxima, la amplitud de marea en la bahía y el desfase entre la marea alta al inicio y al final del canal. Así, se concluye que el método desarrollado para el modelo y la obtención de los parámetros relevantes fue correcto.

En tercer lugar, el resultado para la disponibilidad de energía en el sitio de estudio, la cual es superior a los 1000 MW, confirma el alto potencial energético del canal de Chacao. Ahora bien, esta generación es acompañada por una considerable disminución del caudal natural, lo que puede conllevar importantes consecuencias medioambientales para la zona. Por lo mismo, se realizó un análisis de conservación de caudal, tras el cual también se encuentra un potencial energético considerable en el canal, correspondiente a 468 MW cuando se conserva el 90% del caudal natural.

Por último, se concluye que el modelo desarrollado cumple con su objetivo de ser una aproximación muy simple que es capaz de pronosticar de forma correcta los fenómenos asociados a corrientes de marea y su potencial energético. Si se cuenta con información apropiada respecto a mareas y batimetría, es posible aplicar este modelo a otros sitios de estudio y evaluar preliminarmente su recurso energético sin una mayor complejidad.

4. CONCLUSIONS

Considering the growing environmental problems and the necessity of developing new energy sources, this project sought to develop a one-dimensional model to evaluate the available power of the Chacao Channel located in the X Region of Chile. This location is relevant due to its favorable hydrodynamic conditions for the generation of energy, in addition to having a privileged location.

In the first place, it was concluded that the developed model is a correct implementation of the theory developed by Blanchfield et al. [1]. The validation process, in which model results were compared to theoretical, analytical, and practical case studies (Haida Gwaii, Canada), made possible to determine that we used a model capable of predicting the available power of a channel that connects a bay to the ocean.

However, when the channel is evaluated under conditions close to its natural state without marine energy converters or in scenarios in which resonance phenomena with the bay are important, the results obtained vary in relation to the theory, generally overestimating the natural flowrate. It is worth stressing that these errors clear up when the drag on the flow is greater, which implies that the power predictions are correct.

In the second place, after executing the application on the Chacao Channel, expected magnitudes and acceptable errors (under 5%) for mean velocity, maximum velocity, amplitude of the bay tide, and gap between high tide at the beginning and at the end of the channel, were obtained. Thus, the conclusion is that the method developed for the model and the relevant parameters obtained were correct.

In the third place, the results regarding power availability in the area studied, which surpasses 1000 MW, confirms the high tidal energy potential of the Chacao Channel. However, this power generation comes with a considerable reduction of natural flowrate, which may lead to significant environmental consequences for the area. Consequently, an analysis of flowrate conservation was performed, which revealed a tidal energy potential to 468 MW when 90% of the natural flowrate is preserved.

Finally, it is concluded that the developed model fulfils its goal of being a very simple approach capable of correctly predicting phenomena associated with current tide and its tidal energy potential. If appropriate information regarding tide and bathymetry is available, it is possible to apply this model to other places of study and to evaluate preliminarily their energy resources without much complexity.

AGRADECIMIENTOS

Los datos de marea y batimetría fueron levantados gracias al proyecto FONDEF D09I1052 “Evaluación del recurso energético asociado a corrientes mareales en el Canal de Chacao para la selección e implementación de dispositivos de recuperación de energía” y al trabajo en conjunto con el Instituto Nacional de Hidráulica del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

ACKNOWLEDGMENTS

Tide and bathymetry data was obtained thanks to project FONDEF D09I1052 “Evaluación del recurso energético asociado a corrientes mareales en el Canal de Chacao para la selección e implementación de dispositivos de recuperación de energía” and to the joint work of the National Institute of Hydraulics of the Ministry of Public Works of Chile.

GLOSARIO

Arrastre: El arrastre, o coeficiente de arrastre, se refiere a cuantificar la resistencia que ejerce un objeto sobre un fluido. Esta interacción se asocia a pérdidas de energía en el flujo y también a fuerzas entre el flujo y el objeto.

Batimetría: Información del relieve y la profundidad de superficies sumergidas bajo el agua.

Corrientes mareales: Flujos de agua provocados por variaciones en la marea.

Energía mareomotriz: Energía asociada a los fenómenos marinos y que es aprovechada para la generación de energía eléctrica.

Hidrodinámica: Parte de la dinámica que estudia el movimiento de líquidos y las causas que lo originan.

Marea: Movimiento periódico de ascenso y descenso del nivel del mar.

Mareógrafo: Instrumento que sirve para medir y registrar las variaciones de las mareas.

GLOSSARY

Drag: Drag, stress, or drag coefficient, refers to quantifying the resistance exerted by an object over a fluid. This interaction is associated with energy loss in the flow and also to the force between the flow and the object.

Bathymetry: Information regarding the terrain and depth of areas under the water.

Tidal currents: Water flow produced by tide variations.

Tidal power energy: Energy associated with marine phenomena and used to produce electric energy.

Hydrodynamics: The area of dynamics that studies the movement of liquids and the causes that originate it.

Tide: Periodic movement of rise and fall of the sea water level.

Tidal gauge: Instrument used to measure and register tidal variations.

PRINCIPIO CIENTÍFICO

El modelo matemático utilizado busca estudiar la energía disponible en un canal que conecta una bahía con el mar abierto. En él se resuelven las ecuaciones de continuidad y de conservación de cantidad de movimiento para obtener el caudal en el canal y la altura de marea en la bahía. Tal como lo ilustra la Figura 8, la bahía solo es influenciada por la marea existente en mar abierto y la corriente se genera a través de un canal de sección transversal variable.

El sistema de ecuaciones diferenciales que permite obtener la altura de marea en la bahía corresponde a las Ecuaciones 1 y 2. La Ecuación 1 se obtiene al adimensionalizar la ecuación de Navier-Stokes para un flujo unidimensional y la Ecuación 2 se obtiene al adimensionalizar la ecuación de continuidad del flujo. Para mayor detalle sobre el desarrollo de las ecuaciones se sugiere revisar lo expuesto por Blanchfield et al. [1].

En particular, λ_1^* representa la influencia de turbinas sobre el flujo, por lo que es posible encontrar un valor de él para

SCIENTIFIC PRINCIPLE

The mathematical model used seeks to study the available energy of a channel that connects a bay with the open sea. In it, equations of continuity and momentum conservation are resolved to obtain the flowrate of the channel and the height of the tide in the bay. As shown in Figure 8, the bay is only affected by the tide of the open sea, and the current is formed by a variable cross-section section channel.

The differential equation system that makes possible to obtain the height of the tide in the bay corresponds to equations 1 and 2. Equation 1 is obtained when the Navier-Stokes equation is adimensionalized for an one-dimensional flow and equation 2 is obtained when the equation of flow continuity is adimensionalized. For further detail regarding the development of these equations, please review the work of Blanchfield et al. [1].

In particular, λ_1^* represents the influence of marine energy converters over the flow; therefore, it is possible to find a value

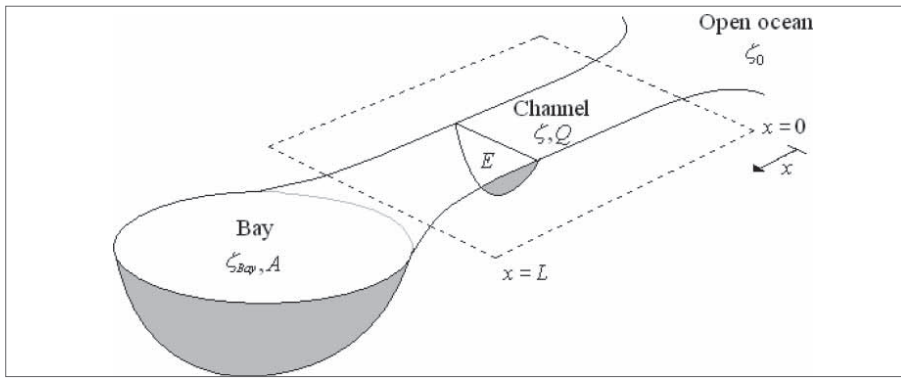


Figura 8. Esquema conceptual del modelo conectando una bahía con el océano [1].

Figure 8. Diagram of the model connecting a bay with the ocean [1].

el cual la generación de energía es óptima. Esta optimalidad se explica debido a que un pequeño número de turbinas implican que aún podría extraerse energía, pero que si este número es muy elevado el flujo se frenará y la generación de energía decaerá.

La relación entre flujo (caudal) y potencia se hace a través de la expresión

$$P_{avg}^* = \lambda_1^* \overline{Q^{*2} |Q^*|^{n_1-1}} \quad (6)$$

donde P_{avg}^* representa la potencia promedio en un canal con un parámetro de turbinas λ_1^* , y donde se promedia la serie de caudales para el último ciclo de mareas.

En cuanto a la velocidad, se asumió un flujo uniforme a lo largo de las secciones transversales, por lo tanto esta puede ser calculada usando

$$u = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

for it at which energy generation is optimal. This optimal generation is possible because a small number of marine energy converters means that energy could still be obtained, but if the number is high, the flow will lose speed and power generation will diminish.

The relationship between flowrate and power is made through the expression

$$P_{avg}^* = \lambda_1^* \overline{Q^{*2} |Q^*|^{n_1-1}} \quad (6)$$

where P_{avg}^* represents the average power in a channel with a marine energy converter parameter λ_1^* , and where the flowrate series is averaged for the last tide cycle.

With regards to speed, a uniform flow was assumed along cross-section areas, therefore this speed can be calculated by using

$$u = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

REFERENCES

- [1] BLANCHFIELD, J., et al. “The extractable power from a channel linking a bay to the open ocean”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2008, vol. 222, no. 3, p. 289-297.
- [2] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. “Summary for policymakers”. En: Edenhofer, O., et al. (eds). *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] MINISTERIO DE ENERGÍA. *Reporte ERNC Febrero 2015*. [online]. Santiago, 2015. Available at: <http://cifes.gob.cl/wp-content/uploads/2014/06/Reporte-ERNC-Marzo-2015.pdf>
- [4] ERRÁZURIZ & ASOCIADOS. *Marine Energy Development, taking steps for developing the Chilean resource* [online]. Santiago, 2013. Available at: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/207868/Marine_Energy_Report_-_ENGLISH.pdf
- [5] BAHAJ, AbuBakr S. “Generating electricity from the oceans”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 7, p. 3399-3416.
- [6] GARRETT, Chris; CUMMINS, Patrick. “Generating power from tidal currents”. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2004, vol. 130, no. 3, p. 114-118.
- [7] BAHAJ, A. S., et al. “Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank”. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, no. 3, p. 407-426.
- [8] CHAMORRO, L. P., et al. “On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial-flow turbine”. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, vol. 716, p. 658-670.
- [9] CHAMORRO, L. P., et al. “Three-dimensional flow visualization in the wake of a miniature axial-flow hydrokinetic turbine”. *Experiments in Fluids*, 2013, vol. 54, no. 2, p. 1-12.
- [10] SUTHERLAND, G.; FOREMAN, M.; GARRETT, C. Tidal current energy assessment for Johnstone Strait, Vancouver Island. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, vol. 221, no. 2, p. 147-157.
- [11] BLANCHFIELD, J., et al. “Tidal stream power resource assessment for Masset Sound, Haida Gwaii”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2008, vol. 222, no. 5, p. 485-492.
- [12] LINDEEN, N. “Hydrodynamic modeling of tidal currents at Chacao channel for a preliminary energy resource assessment”. MA Thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 2012.
- [13] CRUZ, J., et al. “Preliminary site selection—Chilean marine energy resources”. *Garrad Hassan*, 2009.
- [14] AIKEN, C. M. “Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry”. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2008, vol. 113, no. C8.
- [15] INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA. *Evaluación del recurso energético asociado a corrientes mareales en el canal de Chacao para la implementación de dispositivos recuperadores de energía*. Chiloé, 2012.
- [16] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA. *Informe de mediciones en terreno: variables hidrodinámicas, batimetría y variables meteorológicas en el canal de Chacao*. Santiago, 2012.

EQUIPO DE INVESTIGADORES / RESEARCH TEAM



Daniel Gajardo Rodrigo Cienfuegos Maricarmen Guerra Cristián Escauriaza