

# Desarrollo de un rotor hidrocínético para corrientes mareales en la costa de Chubut

## Development of a tidal currents hydrokinetic rotor on the Chubut coast

Presentación: 4 y 5 de octubre de 2022

Doctoranda:

Ana Julia Lifschitz. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Chubut- Argentina.  
anajulialif@gmail.com

Director:

Horacio di Prátula

Codirectora:

Norma B. De Cristóforo

### Resumen

La energía contenida en un flujo de agua (energía cinética) puede aprovecharse transformando el movimiento de desplazamiento en un movimiento de rotación, (energía mecánica) y luego a energía eléctrica, por medio de una turbina hidrocínética (THC). Se plantea el diseño de una hélice para evaluar la factibilidad de instalación de una THC en el Golfo Nuevo, Chubut, Argentina. La forma de operación se eligió de manera de ser simple, autónoma y con perfiles de bajo costo.

**Palabras claves:** corrientes de mareas, rotor hidrocínético, energía.

### Abstract

The energy contained in a flow of water (kinetic energy) can be used by transforming the displacement movement into a rotation movement (mechanical energy) and then to electrical energy, by means of a hydrokinetic turbine (THC). The rotor designed is proposed to evaluate the feasibility of installing a THC in Golfo Nuevo, Chubut, Argentina, in order to evaluate its behavior in an aggressive and variable environment such as currents associated with tides. The form of operation was chosen to be simple, autonomous and low cost.

**Keywords:** tidal currents, hydrokinetic rotor, energy.

### Introducción

La energía contenida en un flujo de agua (energía cinética) puede aprovecharse transformando el movimiento de desplazamiento en un movimiento de rotación, (energía mecánica) y luego a energía eléctrica, por medio de una turbina hidrocínética (THC), dispositivo similar a una turbina eólica. Las THC son máquinas sumergidas que operan en corrientes marinas, ríos y canales artificiales, sin interrumpir el flujo natural del agua (Badea et al 2014). Para el uso de las THC no se requiere construir una gran infraestructura civil como la necesaria en las grandes centrales hidroeléctricas y no dependen de grandes alturas o caídas de agua, lo cual las convierten en una tecnología de menor costo, bajo tiempo de implementación, y presentan un impacto ambiental bajo (Filho et al., 2010; Garden y Bibeau, 2010). Se plantea el estudio de un diseño de hélice para evaluar la factibilidad de instalación de una THC en la costa de Chubut, Argentina, con el fin de evaluar el comportamiento de la misma en un medio ambiente variable como son las corrientes asociadas a las mareas en proximidad de las costas.

El prototipo de hélice tiene carácter preliminar y servirá para plantear las bases de diseño de un prototipo de turbina, estudiar su comportamiento en el ambiente marino y definir los problemas a afrontar en estudios más detallados en un futuro.

## Desarrollo

### Sitio de prueba

Considerando previos estudios (Lifschitz et al. 2019, Lifschitz et al. 2022) se eligió como sitio posible para la instalación de un prototipo de hélice la boca del Golfo Nuevo (GN) en la provincia de Chubut. Los datos de velocidades de corrientes de mareas se extrajeron de la página del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), donde figura el pronóstico de corrientes para el año 2020. El valor medio de estas intensidades fue de 0.53 m/s y valor máximo de 0.8 m/s. Dado que la velocidad media fue de relativo bajo valor, se optó por canalizar el flujo mediante una tobera y así aumentar la velocidad a un valor nominal de 2 m/s. Varios autores han estudiado el efecto de implementar una tobera para acrecentar la potencia de salida (Munch et al, 2009, Garden y Bibeau, 2010). En este caso, la mejora del rendimiento se obtiene con una forma convergente.

### Rotor de una THC

El rotor está compuesto por las palas y el cono central, donde se insertan las mismas. El rotor convierte la energía cinética del flujo en energía mecánica, y la transmite al eje del generador.

La sección transversal de un aspa se conoce como perfil hidrodinámico, y es el responsable de producir la fuerza hidrodinámica útil para la rotación de la hélice.

La fuerza hidrodinámica resultante está compuesta por una fuerza en la dirección normal a la dirección de movimiento, que se denomina sustentación y se denota por  $L$  (lift en inglés), y la componente paralela a la dirección del flujo relativo, pero en sentido contrario al movimiento, se conoce como arrastre,  $D$  (drag en inglés). la fuerza resultante ejerce un momento sobre el perfil.

### Coefficientes hidrodinámicos

La caracterización de las fuerzas que actúan sobre un perfil, en la práctica, se hace a través de la definición de coeficientes adimensionales de sustentación ( $C_l$ ), arrastre ( $C_d$ ), momento ( $C_m$ ) y presión ( $c_{pr}$ ), que describe la distribución de presión sobre el perfil. Estos coeficientes dependen del ángulo de ataque (ángulo entre la velocidad relativa y la cuerda del perfil), de la geometría del perfil y del número de Reynolds. La relación  $C_l / C_d$ , definido como la eficiencia hidrodinámica de un perfil, (Abbott y Von Doenhoff, 1959), debe ser máximo y el ángulo de ataque que corresponde, se conoce como ángulo óptimo, que será el ángulo de ataque particular que tendrá cada sección (excepto el perfil raíz). Si el ángulo de ataque excede su punto máximo, el perfil entra en pérdida de sustentación o stall. En este punto, la sustentación disminuye bruscamente, el arrastre aumenta, y el perfil deja de ser efectivo. Es importante, entonces trabajar con ángulos de ataque fuera de la zona de stall. La obtención de los coeficientes hidrodinámicos fue realizada implementando la herramienta computacional Qblade. Los datos de entrada del software son el tipo de perfil y las propiedades físicas del fluido de trabajo expresados a través del número de Reynolds. El Qblade fue utilizado también para graficar las características geométricas de la pala.

### Ángulos de trabajo.

Se definen los ángulos de trabajo según la Figura 1. El ángulo phi ( $\Phi$ ) se conoce como el ángulo de flujo, alfa ( $\alpha$ ) es el ángulo de ataque y  $\mu$  es un parámetro de diseño y su distribución sobre la pala se conoce como la torsión geométrica, alabeo o twist. La torsión de la pala es necesario para asegurar que todos los perfiles estén trabajando en el ángulo de ataque óptimo. De la Figura se tiene que:

$$\Phi = \text{artg}\left(\frac{\bar{v}}{\Omega r}\right) \quad (1)$$

### Cavitación

El rotor hidrocínético al estar sumergido en el agua puede sufrir cavitación, fenómeno que consiste en la formación de burbujas de vapor debido a la disminución de la presión en un punto. Este efecto tiene consecuencias destructivas cuando las burbujas impactan contra la superficie del rotor dando lugar a fenómenos de cavitación-corrosión, que implican pérdida de rendimiento, ruido, vibraciones y daños estructurales. La cavitación depende principalmente del coeficiente de presión (cpr), cuanto mayor sea cpr, más susceptible a cavitación es el perfil.

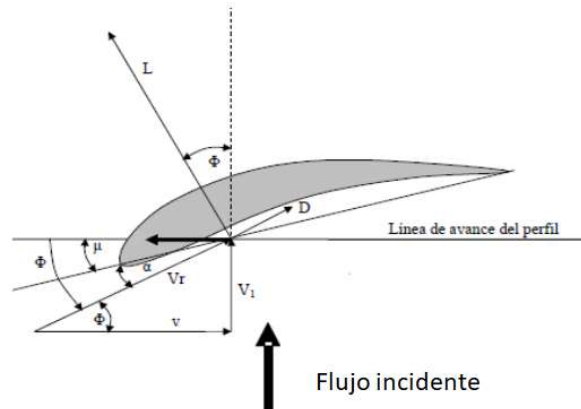


Figura 1: Angulos de trabajo y relación de velocidades

#### Potencia teórica y potencia extraíble

La potencia mecánica del fluido a través del rotor es el parámetro más importante para evaluar la performance de una turbina, y está determinada por la dimensión del mismo (área barrida por las aspas,  $St$ ), velocidad del fluido ( $V$ ) y su densidad ( $\rho$ ), (Lynn 2013). Por razones físicas de continuidad, no se podrá capturar toda la energía del flujo. Esta condición impone una restricción sobre la potencia efectivamente extraíble o útil que puede capturar un rotor, siendo proporcional al coeficiente de potencia o eficiencia de conversión ( $C_p$ ), característica de cada dispositivo. La potencia del flujo interceptado por el rotor se escribe como:

$$P = \frac{1}{2} \rho St C_p V^3 \quad (2)$$

En este trabajo se considera un  $C_p$  de 0.45 (Coiro et al., 2018). La potencia que podrá producir el rotor se determinó siguiendo los planteamientos de la teoría BEM (Blade Element Momentum Theory), que combina la cantidad de movimiento axial del flujo con las características geométricas de la pala.

#### TSR, relación de aspecto y biofouling

Se define la velocidad específica o velocidad media específica (TSR) como la relación entre la velocidad lineal (tangencial) de la punta del álabe ( $\Omega R$ ), siendo  $R$  su longitud, y la velocidad libre del fluido  $V$ . El TSR sustituye al número de revoluciones por minuto del rotor, y sirve para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas. Generalmente se grafica la potencia en función del TSR.

La relación de aspecto o esbeltez del ala  $AR$ , (Abbott and Von Doenhoff, 1959), definida como el cociente entre el largo de la pala (envergadura) al cuadrado y área en planta de la misma, surge del hecho que el ala tiene longitud finita. Este efecto de punta influye en el funcionamiento del rotor. La tobera también es usada como una manera práctica de eliminar los efectos de punta de pala. El biofouling puede tener un impacto operativo y económico significativo. Estas incrustaciones pueden ensuciar las hélices y reducir el rendimiento.

## Resultados

### Diseño hidrodinámico

Se desea obtener una potencia de 2200 W, con una velocidad nominal de operación de 2 m/s, y densidad estándar de 1025.5kg/m<sup>3</sup>. La potencia teórica disponible fue de 4102 W/m<sup>2</sup>. Se eligió un rotor de tres palas fijas (ángulo de paso nulo), de eje horizontal, sumergido. El rotor podrá pivotar libremente y alinearse con la corriente en todo momento. Se eligió una estructura de soporte que permita tener este sistema boyante conectado vía un cable a un muerto fondeado en el lecho marino (sistema Tethered). La profundidad del sitio que se tiene en cuenta (cartas náuticas H-218 del SHN), es suficiente (16 m aproximadamente) como para instalar este dispositivo de pequeño tamaño.

#### Dimensionamiento del rotor

Con la ecuación 2 es posible establecer el valor que debería tener el área barrida por las aspas para obtener el valor de potencia deseado. La misma resulto de 1.195m<sup>2</sup> (a<sub>2</sub>), con un radio (longitud) de R=0.62 m. El plato que sostiene las palas tiene un radio de 0.054m, luego, el radio total del rotor fue 0.674m. con el valor de a<sub>2</sub>, y la velocidad nominal, se calculó el área de trabajo del conducto convergente, de 5 m<sup>2</sup> y radio 1.26 m

#### Elección del perfil hidrodinámico y coeficientes

Existen en el mercado perfiles evolucionados que tienen muy buenas características y comportamiento frente a Re bajos, y presentan mayores eficiencias y calidad hidrodinámica, como los perfiles FX. Esta alta eficiencia se mantiene siempre y cuando la superficial del perfil este pulida y limpia de incrustaciones, (*fouling*). Como la turbina operara en un ambiente marino con un alto contenido de material orgánico e inorgánico, hace muy difícil mantener la pala libre de residuos, y no vale la pena invertir en un perfil tan complejo. Se decidió trabajar con perfiles convencionales más simples, económicos y de menor calidad, pero más tolerantes a alteraciones de su geometría, como son los NACA de cuatro dígitos. En particular se optó por el NACA 2412. El valor del Re del flujo fue de 1.88E5, para una cuerda geométrica de 0.12 m y una viscosidad a 15°C. El valor de Cl/Cd máximo fue de 66.05, con un ángulo óptimo de 6°.

#### Velocidad rotacional de diseño - análisis de cavitación

La definición del cpr permitió calcular la velocidad crítica de las aspas. El criterio para evitar la cavitación fue satisfacer la condición que la velocidad del flujo sea menor a este límite. Con este concepto presente, se estimó la velocidad rotacional crítica o de diseño ( $\Omega d$ ) de 14 1/s y TSR de 4.7, estando la punta de la pala a 1 m de profundidad, en posición vertical. Se consideró la velocidad máxima en este cálculo para asegurarse que el perfil no entre en cavitación.

#### Geometría de la pala.

La forma y tamaño de la pala tiene una alta influencia sobre la potencia que puede extraerse de un rotor. Se consideró una distribución de cuerda lineal, de valor 0.15 m para el perfil raíz y disminuye a 0.1 m para el perfil punta de pala, con una cuerda geométrica de 0.12 m, y pala trapezoidal, forma de construcción que reduce los efectos del momento hidrodinámico de cabeceo (Cm). Según la teoría aplicada (BEM), el rotor es dividido en segmentos. Se decidió trabajar con un modelo de pala dividida en 12 puntos.

##### 3.5.1 Torsión y Condición de arranque de la pala.

El mecanismo de arranque de la turbina se planteó de manera sencilla y se efectuó sin carga sobre el eje (eje libre). Se adoptó como diseño que el perfil raíz tenga una torsión particular, con el ángulo de ataque correspondiente a la máxima sustentación, para generar la cupla de arranque necesaria para que el rotor comience a girar. El alabeo del resto de la pala se obtiene calculando los ángulos phi del triángulo de velocidades (Figura 1) para la velocidad del flujo (V), posición de la pala (r) y la velocidad angular ( $\Omega d$ ). (ecuación 1). Con esta configuración el perfil de la raíz no aportará potencia a la pala y solo será útil para comenzar el giro. De todas maneras, Según Voneschen, (1989), la potencia que suministra esta sección de pala no es significativa. La elección del método de arranque impuso una fuerte condición sobre la torsión de la pala, (figura 2).

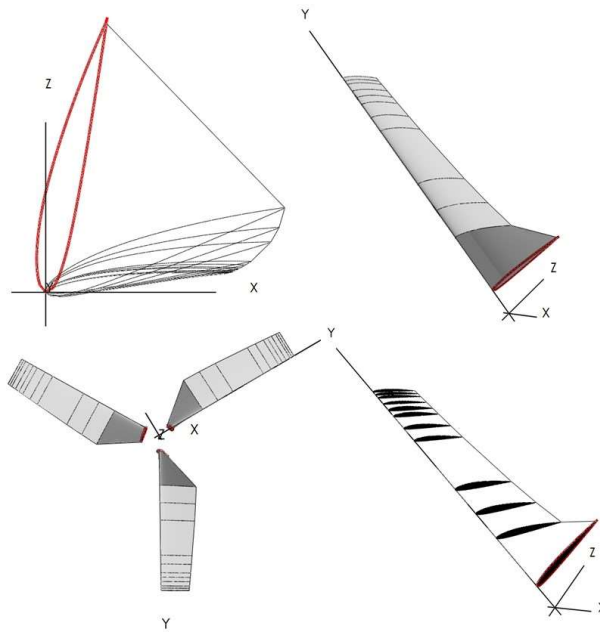


Figura 2: Esquema geométrico para el GN. El perfil raíz fue pintado de rojo

### Curvas de potencia

La figura 3 muestra las curvas de desempeño del rotor propuesto según la teoría aplicada. Se destacan los máximos de potencia cuando el TSR está entre 3 y 5. La potencia es proporcional al cubo de la velocidad del flujo incidente y a medida que esta velocidad aumenta, también aumenta la velocidad rotacional del rotor y, en consecuencia, el ángulo de ataque decrece (ecuación 2), haciendo perder cupla al rotor porque disminuye la fuerza de sustentación sobre las palas. En particular, se obtuvo una potencia de 1673.4 W.

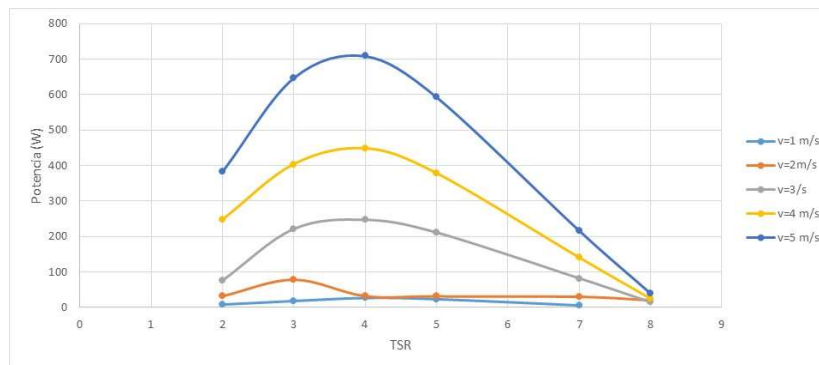


Figura 3. Curvas de potencia según la teoría BEM para un rotor de tres palas horizontal para diferentes velocidades del flujo. Perfil NACA 2412.

### Conclusiones

Se planteó el diseño de un tipo de hélice de potencia de 1673W. El fenómeno de cavitación impuso un límite sobre la velocidad rotacional que podría tener el rotor, igual a 14 1/s. Los efectos de punta tridimensionales resultaron ser quasi-despreciables si se utiliza un rotor entubado. Se decidió que, para los momentos en que la velocidad de la corriente es baja, el rotor pierda eficiencia, no generando potencia útil sobre el eje.

El diseño de la pala se realizó según la condición de arranque elegida. Con esta condición presente, la pala fue diseñada de manera que el 90 % aporte potencia y el perfil raíz solo sea útil en el arranque del giro. Como resultado, el diseño final impuso una fuerte variación en la torsión de la pala. Considerando que la dinámica de las corrientes de mareas en proximidad de las costas

es compleja, dado que la velocidad del fluido es no uniforme en intensidad y dirección, los cálculos presentados deben tomarse como un primer paso exploratorio.

## Referencias

Abbott I. y Von Doenhoff A. (1959). "Theory of wing sections, Including a Summary of Airfoil Data" DOVER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK.  
[https://www3.nd.edu/~ame40431/AME20211\\_2021/Other/AbbottDoenhoff\\_TheoryOfWingSectionsIncludingASummaryOfAirfoilData.pdf](https://www3.nd.edu/~ame40431/AME20211_2021/Other/AbbottDoenhoff_TheoryOfWingSectionsIncludingASummaryOfAirfoilData.pdf)

Badea, I., Pricop, M. V., & Bobonea, A. (2014). "Design procedure and numerical analysis of a small horizontal-axis hydrokinetic turbine". UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 76(3). Recovered from <http://www.researchgate.net/publication/265122794>.

Coiro D. P., Troise G. y Bizzarrini N. (2018). "Experiences in Developing Tidal Current and Wave Energy Devices for Mediterranean Sea". TECHNOLOGY REPORT article. Front. Energy Res., 12 December 2018 | <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00136>

Elliot, D. (2012). "Tidal Power". In G. Boyle (Ed.), Renewable energy - Power for a sustainable

Filho, G. L. T., Souza, Z. De, Rossi, C. a B. De, Barros, R. M., y Silva, F. D. G. B. Da. (2010). "Hydrokinetic turbine". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 12, 12094. Recovered from <http://doi.org/10.1088/1755-1315/12/1/012094>.

Garden, D. L. F., y Bibeau, E. L. (2010). "A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydrokinetic turbines using a validated momentum source turbine model". Renewable Energy, 35(6), 1152-1158. Recovered from <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.023>

Lifschitz, A. j. de Cristòfaro N. B. y Coiro D (2019). "Algunas consideraciones sobre el potencial energético de corrientes de mareas en el litoral de la provincia de Chubut, Argentina". Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe. Año 2019. No.1 ISSN: 2602-8042 (impresa); 2631-2522 (digital).

Lifschitz, Ana J., Coiro C., Troise G, Giaquinta H. Lazcano, F. y De Cristofaro N. (2022). "Kinetic energy of tidal currents ein the province de Chubut, Argentina". Vol 5 No 1. International Marine Energy Journal. DOI: <https://doi.org/10.36688/imej.5.11-22>

Lynn P. A. (2013). "Electricity from Wave and Tide: An Introduction to Marine Energy". Print ISBN: 9781118340912 |Online ISBN: 9781118701669 |DOI:10.1002/9781118701669. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118701669>

Munch, C. y M. Vonlanthen, J. Gomes, R. Luquet, P. Guinard y F. Avellan, (2009). "Design and performance assessment of a tidal ducted turbine". In: Proceedings of the third IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems. Brno, Czech Republic.

Voneschen M F. (1989). "Introducción a la teoría de las turbinas eólicas". Kleine Windräder Berechnung u. Konstruktion" - Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag, 1989. ISBN 3-7625-2700-8