

DESARROLLO PRELIMINAR DE TURBINA HIDROKINÉTICA FLOTANTE PARA CORRIENTES MARÍTIMAS Y FLUVIALES

**Carlos V. M. Labriola, Unidad Académica Caleta Olivia UNPA y Facultad de Ingeniería -
UNCo, carloslabriola54@yahoo.com.ar**

**Hugo Chacón, Universidad de La Patagonia Austral, UACO,
hugomiguelchacón@yahoo.com.ar**

Horacio León, Universidad de La Patagonia Austral, UACO, horacioleon.unp@gmail.com

**Luis Montenegro, Universidad de La Patagonia Austral, UACO,
lsmont2000@yahoo.com.ar**

Ángel Bravo, Universidad de La Patagonia Austral, UACO, angelbravo92@hotmail.com

**Ezequiel Vitorino, Universidad de La Patagonia Austral, UACO,
ezequiel_vito@hotmail.com**

Marcelo Ávila, Universidad del Comahue, FIUNCo, marceloavila_27@hotmail.com

Fernando Liozzi, Universidad del Comahue, FIUNCo, f.liozzi@yahoo.com.ar

Resumen— Desde el año 2012 se viene realizando en el ámbito de la Unidad Académica Caleta Olivia, Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UACO – UNPA – Santa Cruz) junto con Facultad de Ingeniería de la Universidad del Comahue (FIUNCo-Neuquén), el desarrollo de turbinas hidrocínéticas (THC) para uso fluvial y marítimo. La FIUNCO posee un desarrollo y prototipo de aplicación fluvial de THC del tipo flotante que fue ensayada in situ y además la UACO-UNPA posee lugares fluviales (Los Antiguos) y marítimos (Puerto Deseado, Puerto San Julián) posibles para la instalación de prototipos de baja y mediana potencia. Este trabajo presenta las mejoras de diseño en el rotor y generador complementándose el sistema flotante más robusto. La generación de electricidad será con generador de Imanes Permanentes y habrá un rectificador a la salida para usar uno o dos conductores y obtener CC en la orilla del canal, río, ría o bahía, con polo negativo por tierra o por cable respectivamente. En tierra se podrán cargar baterías con regulador de tensión para tener acumulación de energía y luego disponer un inversor para obtener CA. Se implementará un prototipo de 1 a 5 kW para ser escalado a algunas decenas de kW dependiendo de la profundidad de los lugares de emplazamiento.

Palabras clave— *Turbina, Hidrocínética, Mareomotriz, Patagonia*

1. Introducción

Desde 1966 con la primera Central Mareomotriz del Mundo, “La Rance” en Francia [1] se comienzan a utilizar las corrientes de agua, con una tecnología desarrollada (turbinas bulbo mareométricas) en ese tiempo para esa aplicación. El impacto ambiental fue muy relevante, tomándole al estuario del Río Rance una década volver a integrar su fauna ictícola original. El costo por kW instalado superaba el habitual de esa época para emprendimientos hidráulicos fluviales con reservorio, pero se decidió hacerla fundamentalmente para disponer de Mano de Obra y desarrollo tecnológico que moviera la industria pesada como recuperación económico-social en la postguerra europea.

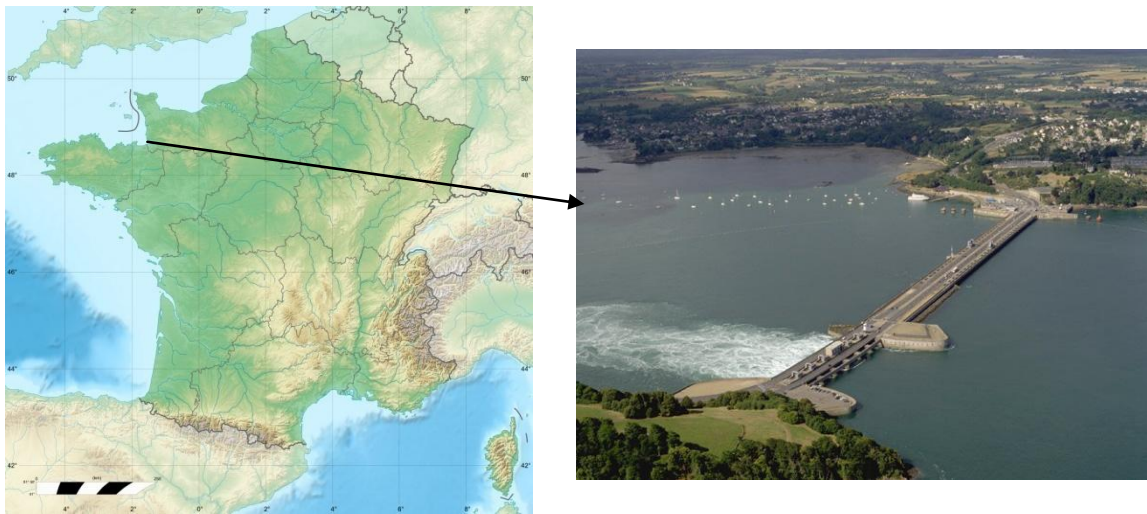


Figura 1: La Rance, Francia.

La Patagonia argentina dispone de una serie de ríos, arroyos, canales y acequias con buena pendiente desde la zona andina hasta la costa atlántica. En esta costa desde Viedma hasta Tierra del Fuego hay corrientes marinas producidas por las mareas durante el día incrementándose la diferencia de mareas con la latitud [2].

Este trabajo propone el uso de turbinas hidrocinéticas, de mínima intervención ambiental por ser flotantes y el giro de sus aspas es muy lento, por ello no producen daño a los peces, cuyo módulo de potencia se adapte a la carga a abastecer. Las aplicaciones pueden ser fluviales o marítimas costeras donde la corriente de agua esté entre 1 a 4m/s. Dependiendo de la potencia a abastecer, las profundidades pueden ser desde 1,5m hasta 20m, para permitir el giro del rotor sin perturbaciones. Dados que los módulos son desde el kW hasta cientos de kW, el tamaño es mucho menor que las turbinas bulbo de igual potencia y además no necesitan prácticamente de instalaciones civiles (diques, compuertas, vertederos, etc.) adicionales. Para potencias de hasta una decena de kW pueden ser flotantes y de más potencia se empotran en el fondo fluvial o marino mediante columnas de acero u H^oA^o [3].

En particular en este desarrollo trabajan dos grupos de Investigación Aplicada consolidados que son:

- Laboratorio de Energía Renovable, Unidad Académica Caleta Olivia de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Santa Cruz.

- Grupo de Energía y Sustentabilidad, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, Neuquén.

2. Estudio del Recurso

En Santa Cruz dada la extensión de la Costa Atlántica y la baja densidad de población rural en el interior de la Provincia cercana a corrientes fluviales, los lugares marítimos son más variados y de muy buenas características hidráulicas.

En la Región Comahue en cambio, por ser una provincia mediterránea circundada por los ríos Neuquén, Colorado, Limay y Río Negro, todos con su variedad de afluentes, las posibilidades de aplicación fluvial son relevantes sobre todo para las chacras y población del interior Neuquino y de la provincia de Río Negro.

2.1 Análisis del Recurso Fluvial

Para el caso de Santa Cruz, se analizó la zona cercana a Los Antiguos, dada la demanda energética de las chacras, en particular cercanas a los canales del río Jeinimeni [2]. En la actualidad cuentan con canales de riego distribuidos de la siguiente manera: un canal principal de 4 km de longitud, 7 canales secundarios de 10.47 km y siete canales terciarios de 3.1 km. Sobre el principal y los secundarios se podrían instalar las turbinas hidrocínética motivo de este trabajo.

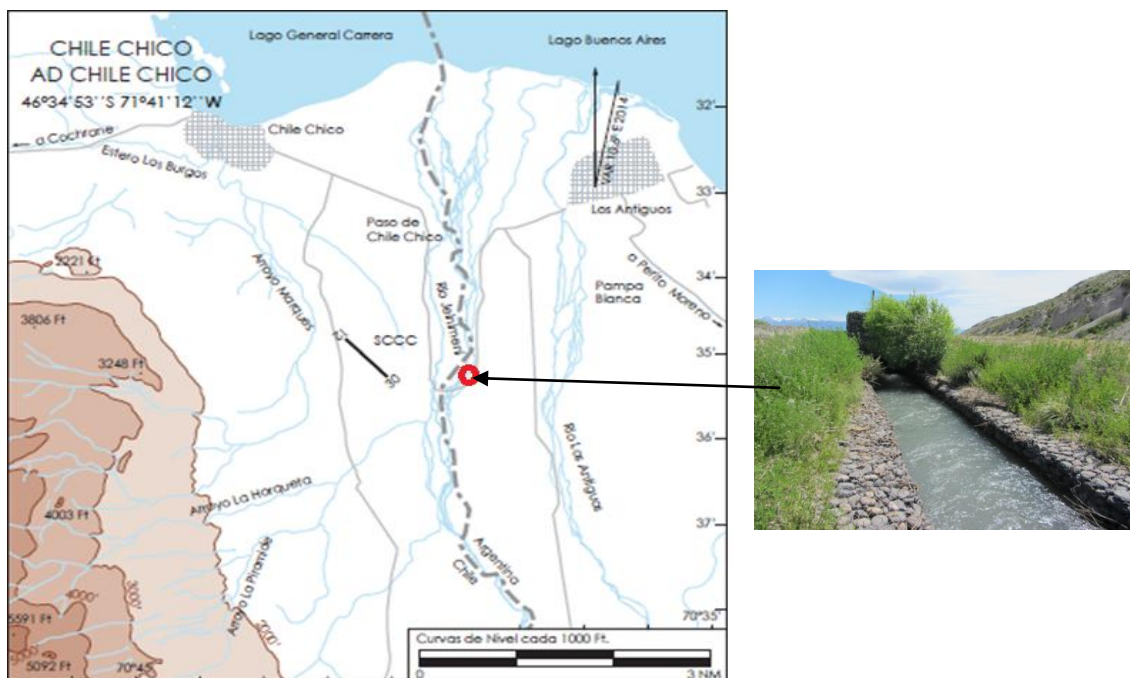


Figura 2: Ubicación del río Jeinimeni (izq.) y vista del canal de riego (der.) [2].

En el caso del Comahue, se analizó en el río Limay, zona de la Herradura cercana a un camping rodeado de chacras, [4]. Además se estudió el recurso fluvial en el Río Negro en el puente que cruza el río en la zona de la Isla Verde, cercano a Cipolletti [5].

En la Tabla 1 se resumen los valores medidos de la corriente fluvial para el Comahue y Santa Cruz (Profundidad: H; Velocidad de la Corriente: Vw):

Tabla 1: Velocidad de fluido y profundidades para localidades en estudio fluvial

Lugar	Vw (m/s)	H (m)	Observaciones
Santa Cruz	1 a 2	1	Canal del Río Jeinimeni. Hay que cavar a 1,5m de profundidad en la zona de la turbina para obtener 1kW con 1,8m/s [2].
Neuquén	0,8 a 1,2	1,2	Riío Limay, la Herradura [3]. Mediciones a 5m de la orilla. Potencia de 150w con 1,2m/s
Río Negro	0,5 a 1,4	1,5m	Río Negro, Isla Verde, Cipolletti [5].

2.2 Análisis del Recurso Marítimo

Las aplicaciones marítimas estudiadas son para puerto San Julián y Puerto Deseado en la provincia de Santa Cruz. En ambos casos para alimentación de emprendimientos que pueden ser turísticos o PYMES industriales.

Tabla 2: Velocidad de fluido y profundidades para localidades en estudio marítimo [3].

Lugar	Vw (m/s)	H (m)	Observaciones: valores obtenidos de cartas del SHN.
San Julián	1,5 a 3,5	1	Boca de la Ría/Bahía de San Julián
Puerto Deseado	1,2 a 4,2	1	Boca de la entrada a la Bahía de Puerto deseado

3. Diseño preliminar

Se realizó un diseño y construcción previa durante el 2008-2009 tomando como referencia perfiles aerodinámicos de turbinas eólicas confeccionados en forma maciza. Se elaboró también un sistema de producción en escala de las aspas mediante centrifugado (ver Figura 3) [4]. Además se comprobó con éxito el sistema de flotación. Dado que la densidad del agua es alrededor de 800 veces mayor que la del aire, los esfuerzos en las aspas son considerables al estar sumergidas en agua y a pesar de ser enteladas con fibra de vidrio y macizas se trisaron en sucesivas inmersiones. Los sellos del multiplicador y generador también sufrieron deterioro.



Figura 3: Molde de chapa de aspa, con refuerzos para centrifugado en torno [4].

Se pudo comprobar con éxito el sistema rebatible sobre la plataforma que permite introducir en el agua y sacarla de ella a la turbina cuando sea necesario. Este sistema consiste en el montaje del eje de la turbina en el vértice de un triángulo que pivota en otro vértice sobre la plataforma (Ver figura 4)



Figura 4: Rotor de tres aspas (izq.) – Rotor de turbina en sistema flotante (der.) [4].

A partir de esta experiencia se comenzó a trabajar en un nuevo perfil combado mucho más grueso y confeccionado con fibra de carbono.

3.1 Elección del nuevo perfil del aspa

Los puntos y parámetros relevantes de un perfil de aspa se aprecian en Figura 5:

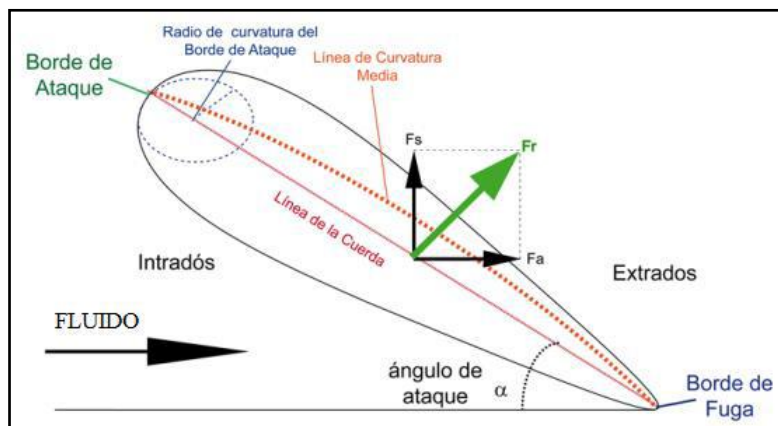


Figura 5: Punto y parámetros relevantes de un perfil de aspa [6].

En Figura 5 se aprecian las características de los perfiles simétricos y combados estudiados.

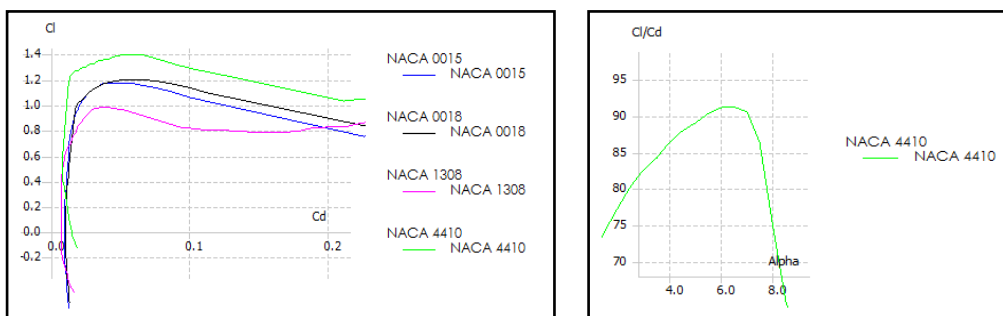


Figura 6: Coeficiente de Sustentación (Cl) en función del Coeficiente de Fricción (Cd) (izq.) - Relación Cl/Cd en función del ángulo de ataque (α : Alpha) [6].

Estos resultados se validaron con simulación con elementos finitos analizando además la estela que dejaba el rotor aguas abajo. [8]

3.2 Sistema de vinculación electromecánica rotor-generador

Se estudió inicialmente un sistema de multiplicación entre el rotor (40rpm, promedio entre 1,5 y 2,5 m/s de velocidad de fluido) [4] y el generador (1000rpm, generador de 6 polos) para obtener una buena variación de flujo magnético en el estator del generador. La multiplicación resultante sería de 25 veces y se pensó en un sistema de varias etapas de engranajes planetarios.

Esto nos daba no solo una complicación de volumen, peso y costo, sino también el problema de sellado del eje sobretodo en aguas marinas complicando el mantenimiento [9]. Por lo tanto se decidió integrar el generador al rotor de la turbina similar a las turbinas hidráulicas Straflo y de esa manera eliminar el multiplicador y sellos del generador.

3.3 Generador e instalación eléctrica

Al eliminar el multiplicador, la multiplicación la realiza el generador con multipolos garantizando velocidades del rotor inductor con el inducido adecuadas para obtener una tensión de salida aceptable para cargar baterías y acumular energía. La expresión que permite obtener el Nro. de Pares de Polos (P) para $n=20$ rpm promedio del rotor de la turbina y frecuencia de la señal inducida $f=50\text{Hz}$, es:

$$P = 60 \times f / n = 60 \times 50 / 40 = 75 \text{ pares de polos} \quad (1)$$

Considerando cada arrollamiento del inducido de unos 4cm de diámetro y 150 polos nos daría una circunferencia de 600 cm y por lo tanto un diámetro de 28cm. Considerando el acople a la raíz del álabe se nos sumarían unos 6cm lo que nos daría unos 34 cm de diámetro bruto.

El generador será del tipo síncrono con inductor en el rotor de imanes permanentes (IP) de Nd-Fe-Bo conformados par obtener la mayor inducción posible. En el estator estarían las bobinas de inducido distribuidas en un anillo fijo a la estructura triangular rebatible del sistema flotante. Esquemáticamente, como una vista de frente, el generador integrado al rotor, quedaría de la siguiente manera:

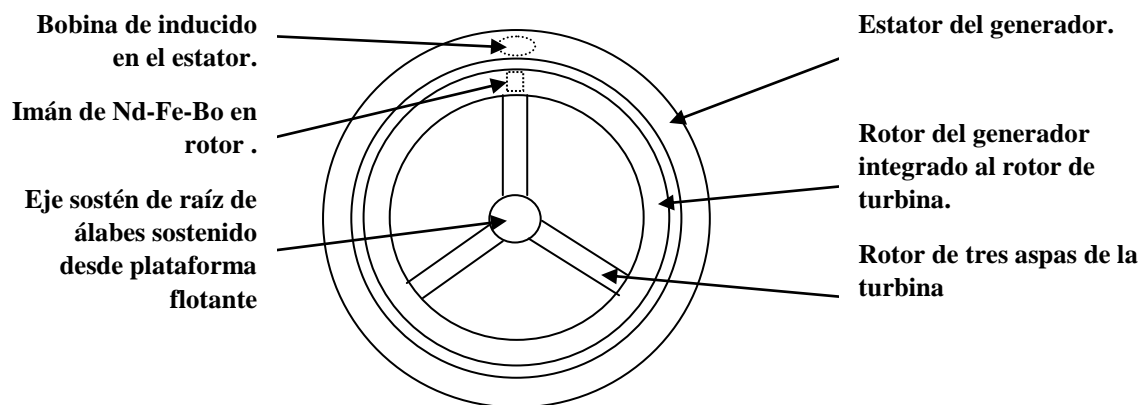


Figura 7: esquema de vista de frente de generador de IP integrado al rotor de la turbina.

Al ser el generador síncrono de IP la excitación magnética es fija y no necesita de conexiones del rotor al exterior para alimentación externa de Corriente Continua (CC). Por lo tanto se eliminan los sellos entre el rotor y estator, permitiendo que pase el fluido por el entrehierro, refrigerando al inducido.

Las bobinas se diseñarán y se conectarán en un arreglo serie paralelo nos darán una tensión de CA a rectificar cuyo valor en CC sea acorde a las máximas de las baterías de acumulación de energía (14V, 28V 52V). Es de destacar que las tensiones citadas son de acuerdo a las necesarias para que el regulador de tensión cargue las baterías. En la salida del regulador a la carga habrá un ondulator para disponer de CA en la carga.

El esquema circuital será según se muestra en la Figura 8:

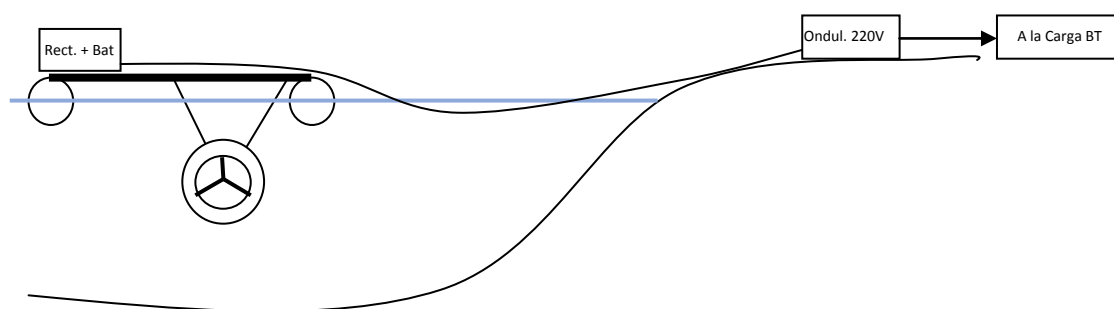


Figura 8: Esquema Circuital para turbinas flotantes de hasta 500W.

3.3 Pre-dimensionamiento

Para determinar el área barrida según la potencia en la entrada de la carga utilizamos la expresión de las turbinas eólicas teniendo en cuenta lo siguiente:

$$P [w] = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot \eta_{\text{generador}} \cdot \eta_{\text{rectificador}} \cdot \eta_{\text{inversor}} \cdot \eta_{\text{cables}} \cdot A_{\text{barrida}} \cdot (V_{\text{fluido}})^3 \quad (2)$$

Veremos para potencias de 200W, 500W y 1kW con los siguientes coeficientes y parámetros:

C_p : 0.2 a 0,3, adoptado 0,25

ρ_{agua} : 1000kg/m³

$\eta_{\text{generador}}$: 0,9

$\eta_{\text{rectificador}}$: 0,9

η_{inversor} : 0,9

η_{cables} : 0,9

A_{barrida} : a averiguar [m²]

V_{fluido} : se adopta promedio 2m/s

Despejando el área barrida de (2) para las potencias dadas y velocidades estimadas, y con los datos de arriba se obtienen los resultados de Tabla 3:

Tabla 3. Pre-dimensionamiento del rotor

Potencia W	$\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot \eta_{\text{generador}} \cdot \eta_{\text{rectificador}} \cdot \eta_{\text{inversor}} \cdot \eta_{\text{cables}}$	Velocidad del fluido m/s	Área barrida m ²	Diámetro del rotor m
300	82,01	2,00	0,46	0,76
500	82,01	2,00	0,76	0,98
1000	82,01	2,00	1,52	1,39
5000	82,01	2,00	7,62	3.16

Como se puede apreciar para el caso fluvial en los canales cerca de Los Antiguos, nos limitamos a 500W por las dimensiones del canal. Así, tendríamos un diámetro de casi un metro, pero la turbina no necesitaría flotadores ya que el bastidor puede apoyarse en el borde firme de piedra del canal según muestra Figura 2. Para el caso de los ríos Neuquén y Negro, se puede alejar de la costa hasta una profundidad de 2m o más y disponer el sistema de 1kW flotante.

Para el caso marítimo es conveniente turbinas de 1 o mas kW, teniendo en cuenta que para 5kW ya tendríamos que necesitar alrededor de 4m de profundidad.

Hay que tener mucho cuidado con la sobre-velocidad de la turbina ya que para el caso de la de 5kW, en caso de funcionar en vez de 2m/s, lo hiciera a 3m/s, la potencia de salida sería casi 17kW, por ser proporcional la potencia al cubo de la velocidad del fluido. Por lo tanto debe ser sobredimensionado el generador por lo menos al doble de potencia ante variaciones leves de la velocidad del fluido (hasta 2,5m/s) y protegido contra sobrecarga.

4. Construcción

La construcción es en dos etapas paralelas, por un lado evaluando los pesos máximos de todo lo posible por poner en el bastidor flotante se calcula el sistema de flotación y el bastidor. Este último se realiza en caño estructural pintado con pinturas epoxi para evitar la corrosión. Los flotadores son de PVC con tapa con el diámetro según el peso.

Por otro lado se diseña el generador al doble de la potencia nominal, dando el dato de su peso para el cálculo del sistema flotante. El rotor de la turbina, según los diámetros dados en Tabla3, será de tres aspas para tener balanceadas las cargas estáticas y dinámicas de rotación. En su periferia integra los imanes permanentes en un anillo construido en fibra de vidrio con resinas plásticas (FVRP). El eje de este rotor, donde convergen las raíces de las tres aspas, está apoyado en dos bujes sostenidos por tensores macizos adosados al estator evitando interferir con el flujo de agua que ingresa a la turbina. El estator es otro anillo concéntrico con el rotor al cual sostiene. Es un tubo hecho en FVRP con una forma de tipo Venturi para acelerar el flujo en la zona del rotor donde el diámetro del tubo es más estrecho. Éste a su vez es sostenido por tensores macizos que conforman el triángulo abatible de la plataforma flotante.

4.1 Elección de Materiales

En la siguiente tabla podemos apreciar el detalle de materiales de cada parte según lo escrito hasta ahora:

Dispositivo	Material	Observaciones
Flotadores	Caño de PVC, con tapa en ambos lados pegada, herméticos.	Del tipo de cloaca de 110mm ó 300mm.
Bastidor	De caño estructural cuadrado/ rectangular.	Soldado y pintado con pintura epoxi para evitar corrosión.
Turbina, estator, rotor y álabes	Fibra de vidrio bidireccional y robing, recubiertos en varias capas con resina poliéster. Alabes con fibra de carbono.	Los álabes serán macizos y llevan fibra de carbono por los esfuerzos a que los somete el fluido.
Baterías	Para 500W pueden ser del tipo GEL. Para potencias mayores de 1kW serán de Pb-ácido.	Deben ir en caja de FVPR con ventilación natural.
Rectificador	Puente de diodos y filtro según las V definidas.	En caja estanca.
Ondulador	Monofásico o trifásico.	Según la carga a abastecer.
Cable a la costa	Puede ser monofásico sin tierra si se lleva CC a la costa o monofásico/ trifásico con tierra si se lleva CA a la costa	Debe ser del tipo Sintenax flexible, sin uniones entre conexiones.

5. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Podemos afirmar que es factible desarrollar y construir una turbina flotante del diseño que presenta este trabajo, con materiales que se pueden conseguir en nuestro país, y adaptable a las situaciones de aplicación en canales, ríos o costa Atlántica patagónica.

El generador tipo Straflo es una aplicación con IP de Nd-Fe-Bo donde el grupo de trabajo ya tiene experiencia en el uso de estos IP en otros generadores de CA y excitación fija y puede inferir su rendimiento de 0,9. Se ha tomado este valor conservador a pesar de que en generadores anteriores desarrollados se llegó a un rendimiento de 0,95 [9] .

6.2 Recomendaciones

Dado que el diámetro es mayor que las dimensiones del canal fluvial (1m de profundidad) deberá dragarse la zona de instalación, y adaptarse con H^oA^o reduciendo la rugosidad del lecho y paredes.

El Ondulador puede ser monofásico o trifásico según las necesidades de la carga. El esquema de Figura 8 es para turbinas flotantes hasta 500W, para potencias mayores a 1kW el peso de las baterías es relevante y podría sobre dimensionar el bastidor con flotadores. También hay que ver a esa potencia si vale la pena poner el ondulador en la costa o en la turbina según costo y peso del cable, ya que puede darse para los casos de aplicaciones en el mar que la turbina deba ubicarse a varias decenas de metros de la costa.

6. Referencias

- [1] LA RANCE (2016). Visita técnica en el ámbito del PDTS 237: *Centrales Eléctricas Maremotrices mediante "albúferas" artificiales en Argentina*. Director: Dr. Luis Bertani (Facultad de Humanidades), Co-Director: MSc. Carlos Labriola (Facultad de Ingeniería), Universidad Nacional del Comahue, 2016-2018.
- [2] CAIM (2016). Trabajo: *Desarrollo experimental de un modelo de turbina hidrocínética, para instalar sobre los canales del río Jeinimeni*. Autores: integrantes del LER. Presentado en el Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Universidad nacional de Resistencia, Chaco, septiembre 2016.
- [3] WREC (2008). Trabajo: *Wind-Tidal Combined Generation System for Patagonia. Argentina*. World Renewable Energy Congress, University of Glasgow, Escocia, reino Unido 19 al 25 de Julio del 2008.
- [4] HYFUSEN (2009): Trabajo: *Turbina flotante para ríos, canales y pequeños cursos de agua naturales con pendiente*. Autores: Labriola, C.V.M., Kirs, E., Lagos, C.. Congreso de Hidrógeno y Energía Renovable, San Juan, Junio 2009.
- [5] FIUNCo (2014): *estudio dl recurso en el Río Negro para instalación de turbinas Hidrocínéticas*. Trabajo realizado entre personal del INTA y el GES de FIUNCo. Febrero-marzo 2014.
- [6] VITORNO, E. (2016): Informe Científico Técnico: *Sistemas conversores Fluido-Dinámicos de Energía Renovable para la Patagonia – Argentina. Elección de*

- Perfiles de rotor*. Autor: Ezequiel Vitorino. Director de Beca: MSc. Carlos Labriola. 2016-2017. Publicado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNPA.
- [7] QUISPE, F.M. (2005). Tesis de Grado: *Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Dpto. Ingeniería Mecánica de Fluido. Perú.
- [8] BRAVO, A. (2017). Informe Científico Técnico: *Sistemas conversores Fluido-Dinámicos de Energía Renovable para la Patagonia – Argentina. Sistema multiplicador*. Autor: Angel Bravo. Director de Beca: MSc. Carlos Labriola. 2017-2018. Por ser publicado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNPA.
- [9] ALVARADO, L., COUCHEZ, D. (2017). Proyecto de aprobación de la Asignatura Máquinas Eléctricas I: “ Generador de Imanes Permanetes”. Construcción y ensayo de un generador de Imanes permanentes a partir de estator de máquina asincrónica.. Autores: Lucas Alvarado y Daniel Couchez. Tutores del proyecto: MSc. Carlos Labriola, Ing. Marcelo Ávila, Marzo 2107, FIUNCo.