

## Generación De Energía Eléctrica Mediante Turbina Hidrocinética En El Río Uruguay

Griss, Leonardo Daniel; Schefer, Roberto José Martín; Terleski, José Ariel; Reversat, José Horacio; Cabral, Roberto José

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM).*

*Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina*

e-mails: leonardogriss@gmail.com, robertoschefer51@gmail.com, joséterleski@gmail.com, hreversat@fio.unam.edu.ar; robert\_rjc@fio.unam.edu.ar

---

### Resumen

Este informe presenta el trabajo realizado hasta el día de la fecha en el plano de la asignatura “Proyecto Electromecánico 2”, en donde se trabaja como tema elegido por el grupo el estudio de factibilidad de la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de energía hidráulico mediante turbina hidrocinética ubicado sobre en el río Uruguay en la localidad de Panambí Misiones. Este trabajo aborda el estudio de estado de arte y el estudio técnico realizados con el fin de obtener un prototipo funcional.

**Palabras Clave – Energías Renovables, Generación de energía eléctrica, Turbina Hidrocinética, Turbina.**

### 1. Introducción

La energía eléctrica se ha convertido en una necesidad de la sociedad, siendo de vital importancia en el día a día. Su generación ha llevado a la sociedad a consumir constantemente recursos no renovables, lo que tarde o temprano tendrá un desenlace ya conocido, el agotamiento de los mismos.

Es entonces de vital importancia encontrar nuevas alternativas al problema, encontrar soluciones que no generen ningún tipo de cambio en el ambiente, soluciones que nos permitan vivir en un mundo sano y limpio, es aquí donde entran las energías renovables, que permiten utilizar energía del ciclo natural del mundo: la salida del sol cada día, las corrientes naturales de océanos y ríos, los flujos de aire por todo el mundo, entre otros.

La energía hidrocinética, es sin duda una de las mejores alternativas, ya que sin generar ningún tipo de polución y sin afectar el ambiente acuático, son capaces de generar energía eléctrica de una fuente inagotable como es el constante ciclo del agua.

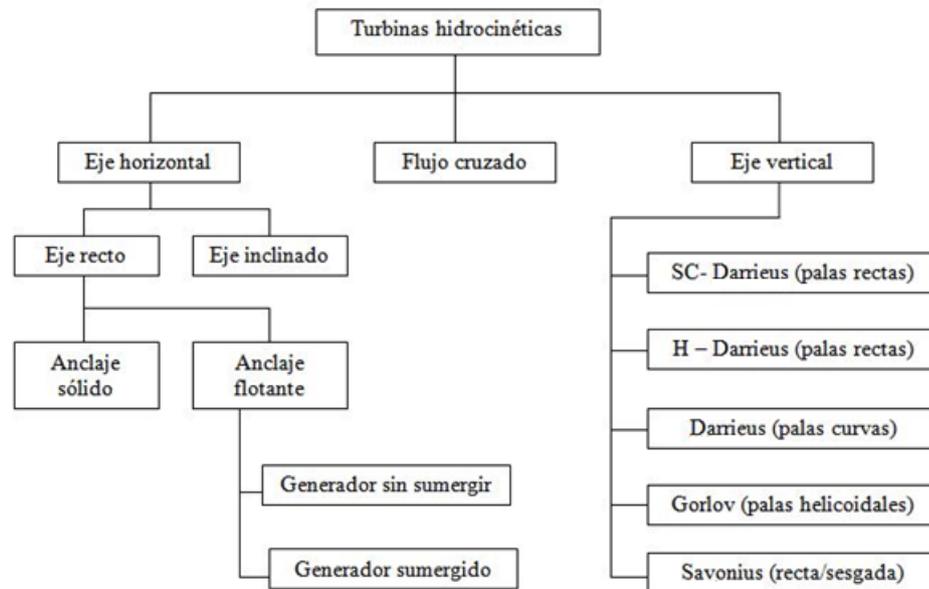
Se plantea como objetivo del trabajo finalizar con un prototipo funcional, que pueda ser replicado en toda la provincia, para poder mejorar la matriz energética y brindar la posibilidad de acceder a ella a poblaciones alejadas.

### 2. Estudios de estado del arte

En primera instancia, se realiza un estudio de estado del arte en la zona y la región, de esta forma conocer los tipos de turbinas disponibles en el mundo y las tecnologías empleadas.

Las máquinas utilizadas para esta transformación de energía poseen tres variables que las diferencian entre ellas: el tipo de turbina utilizada y su diseño, su anclaje ya sea al lecho del río o mar y el tipo de generador eléctrico utilizado.

Entre los tipos de turbinas, se diferencian 3 grupos muy marcados, como puede visualizarse en la **Fig. 1**, turbinas de ejes horizontales o de flujo axial (turbinas hélices), turbinas de ejes verticales o de flujo transversal (Darrieus, Gorlov, Savonius) y sus variables diseñados para trabajar con flujo cruzado [1].



**Fig. 1. Clasificación de turbinas hidrocinéticas [1].**

Desde el punto de vista del anclaje, hay varios tipos constructivos. En la actualidad hay varios modelos que van desde una fundación en el lecho del río, contrapesos en la base de la turbina, torres de soporte, etc.

En cuanto al generador, en el ámbito comercial las empresas constructoras trabajaron usando un sistema con caja amplificadora y generador de inducción (SeaFlow, SeaGen, Kinetic Hydropower System (de Verdant Power), H300 (de Hammerfest Strøm), entre otros) pero a partir del año 2011, la mayoría de los nuevos desarrollos han migrado a sistemas con una caja de una etapa y generador de imanes permanentes (EnCurrent Turbine, Cycloidal Turbine, Clean Current) o sistemas de acoplamiento directo con generadores de imanes permanentes (Clean Current Tidal Turbine, Open-Centre Turbine (de OpenHydro group), Tocardo, OCGen TGU) [2].

En la actualidad se encuentran distintos prototipos de turbinas hidrocinéticas de distintas características constructivas.

En Misiones, en la Facultad de Ingeniería de Oberá, alumnos del 5° año de la carrera de Ingeniería Electromecánica, en el año 2010, han desarrollado un prototipo de turbina hidrocinética de eje vertical, para generar energía a partir de la corriente de agua, la cual consta de un grupo

generador que sería instalado en el lecho del río o el cauce de un arroyo. Se utilizó como base la turbina del tipo helicoidal desarrollada por el investigador Alexander Gorlov [3].

Del pequeño prototipo desarrollado con álabes de 30 por 30 cm se obtuvieron potencias de 15 a 20 W. El modelo desarrollado se observa en la **Fig. 2**, en el que se puede observar la disposición vertical del eje y los alabes de la turbina.



**Fig. 2.** Turbina desarrollada en la Facultad de Ingeniería de Oberá, Misiones [3].

La UTN Paraná ha desarrollado un proyecto que busca la aplicación de las turbinas de ríos de llanura, de tipo Gorlov, para abastecer la demanda de energía eléctrica de una boya de río, de las muchas ubicadas en el río Paraná [4].

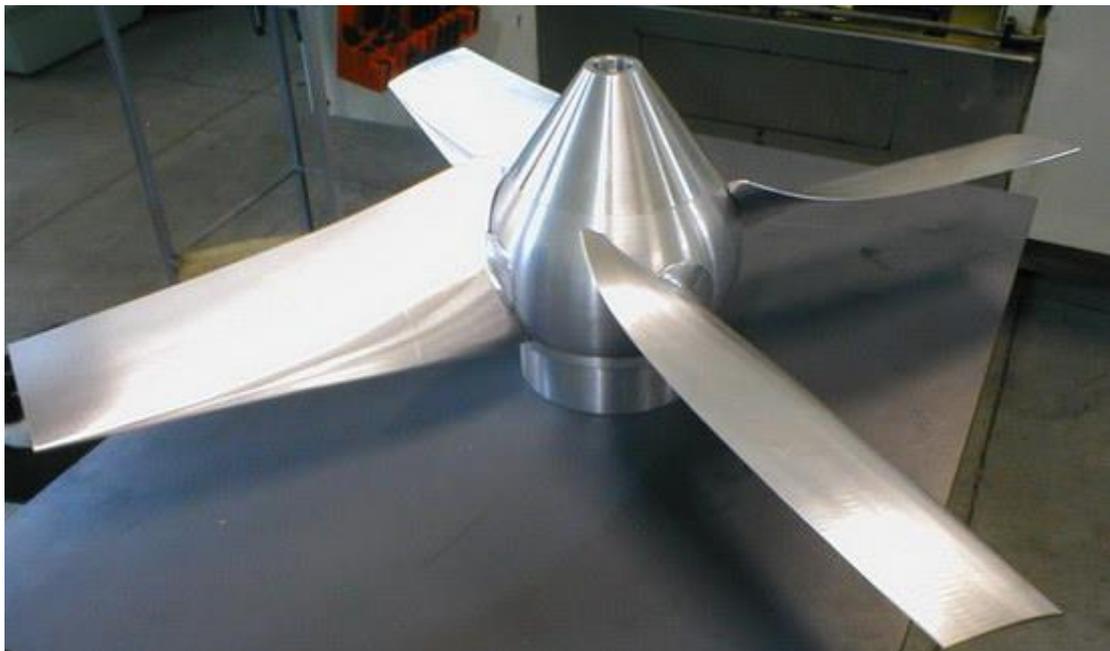
El sistema consta de una turbina en la parte inferior de la boya, en la que a través de un sistema está conectado a un generador eléctrico que se encuentra en la boya.

Esta energía producida es utilizada, principalmente, para la iluminación de la boya. En la **Fig. 3** se observa el modelo de la turbina desarrollada.



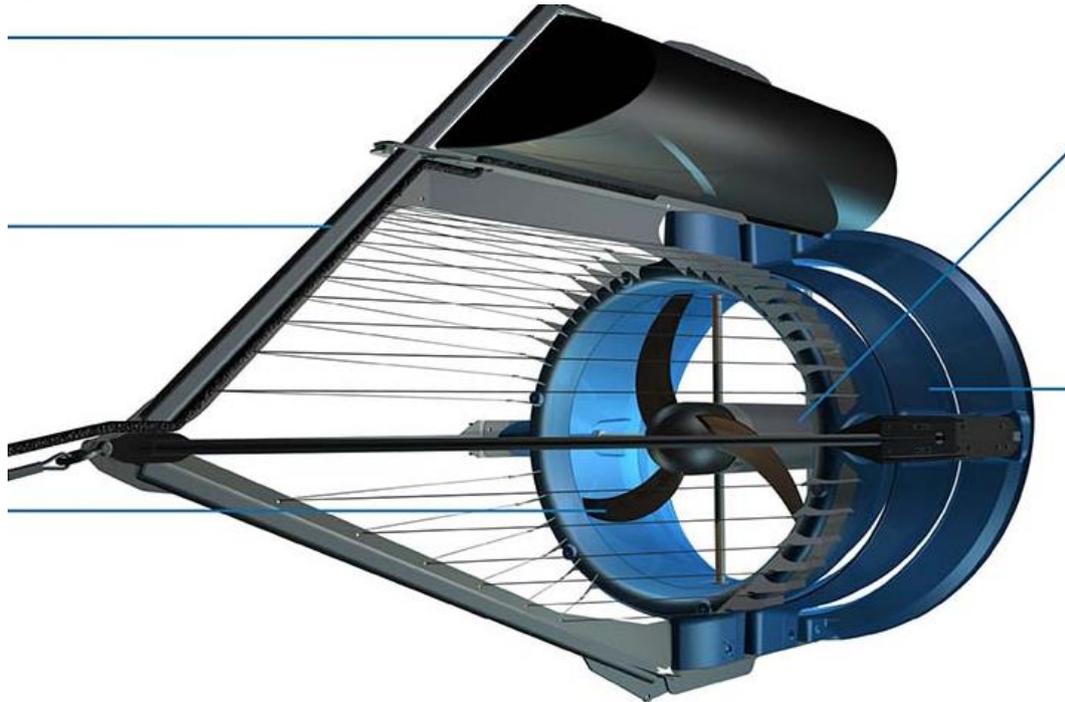
**Fig. 3. Turbinas de ríos de llanura desarrollada por la UTN Paraná [4].**

En la **Fig. 4** se visualiza una de las turbinas desarrollada por el INVAP (Instituto de Investigaciones Aplicadas) en 2014, una empresa dedicada al diseño y construcción de sistemas tecnológicos, la cual posee su generador sumergido, y contiene un canalizador de flujo que acelera la velocidad del fluido para de esta manera obtener un mayor aprovechamiento. Realizaron un prototipo a escala reducida (1kW) el cual fue ensayado sin el canalizador, posteriormente construyeron un prototipo de 4,5kW, utilizando dos o tres rotores gemelos pudieron obtener mayor potencia.



**Fig. 4. Prototipo de turbina desarrollada por el INVAP [5].**

Smart Hydro Power [6], una empresa privada alemana con fines de lucro fundada en 2010, comercializa distintos tipos de turbinas hidrocínéticas, como la visualizada en la **Fig. 5**, apoyadas en el fondo del canal o flotantes, las cuales tienen instalados generadores de 5kW, y un controlador electrónico para funcionar fuera de la red o conectado a ella.



**Fig. 5. Turbina hidrocínética de Smart Hidro Power, modelo smart monofloat [6].**

Verdant Power es una empresa con sede en Nueva York [7], con filiales en Canadá y el Reino Unido, desarrolla tecnologías y proyectos que generan energía a partir de las corrientes que fluyen libremente de las mareas, ríos y canales. Utiliza turbinas de eje horizontal completamente bajo el agua y no son visibles desde la superficie para convertir la energía cinética de las corrientes de agua en movimiento rápido ( $> 1,8\text{m/s}$ ) en electricidad. Se utiliza un montaje de marco triangular de acero que admite tres turbinas, el cual es depositado y anclado en el fondo del río.

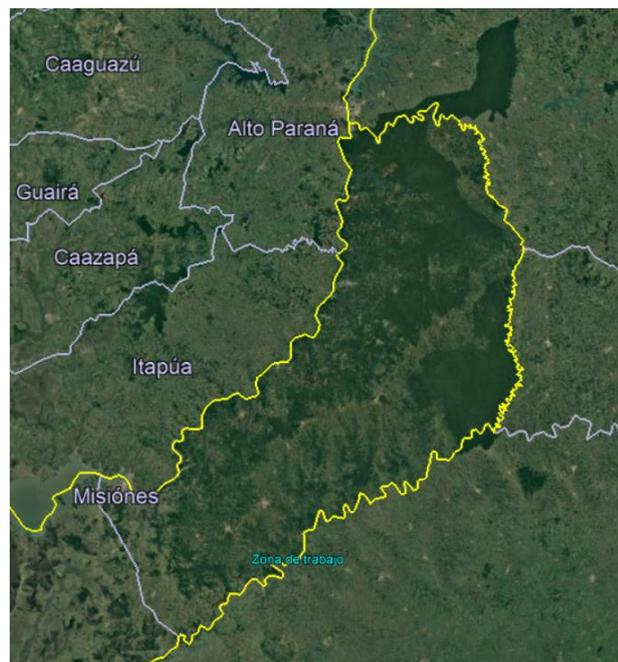
La turbina visualizada en la **Fig. 6** está equipada con un rotor compuesto con tres palas de paso fijo que giran a aproximadamente 32 rpm y tiene un diámetro de 5 m, la transición y el generador se encuentran sumergidas para una potencia de 35 kW [7].



**Fig. 6. Turbina hidrocínética de la empresa Verdant Power, cuarta generación [7].**

### **3. Toma de datos río Uruguay**

En la **Fig. 7** se visualiza la posición aproximada en el mapa de la zona evaluada mediante mediciones, la cual se encuentra Sobre el río Uruguay a la altura de la localidad de Panambí, Misiones, Argentina [8].



**Fig. 7. Ubicación del área evaluada [8].**

En la **Fig. 8** se visualiza la posición del área evaluada, que se encuentra a la altura del camping Cachoeira do roncadour, en Lambari, MG, en el país vecino Brasil.



**Fig. 8. Área de trabajo [8].**

Las mediciones sobre el área de interés del Rio Uruguay se realizaron con un molinete hidrométrico universal SIAP, que se visualiza en la **Fig. 9**.



**Fig. 9. Molinete Hidrométrico**

Funcionamiento del instrumento: el movimiento de la corriente produce un giro de la hélice, en donde un dispositivo comandado por un contador de revoluciones cierra un circuito eléctrico al cual

está conectado un indicador acústico, con la ayuda de un cronometro y la cantidad de giros se puede determinar la velocidad de la corriente de agua.

El procedimiento que se siguió para realizar las mediciones en cada punto fue, primeramente, medir la profundidad del río, luego, colocando la hélice a una profundidad de 0,2 de la profundidad total se procedió a contar con un cronometro el tiempo que tardo en realizar 200 vueltas la hélice (20 indicaciones sonoras), para el mismo punto se procedió también a realizar la medición a distintas profundidades, 0,6 y 0,8 veces la profundidad total medida desde la superficie.

Este procedimiento se realizó para distintos puntos de interés, posteriormente se calculó la velocidad del agua utilizando las mediciones, para esto se utilizó la ecuación de calibrado.

Mediante estas mediciones se determina una franja de trabajo sobre un canal cercano a la zona, en donde se registraron valores de velocidad media de alrededor de 1,3 m/s.

#### 4. Cálculo de la turbina de 3 alabes de eje horizontal:

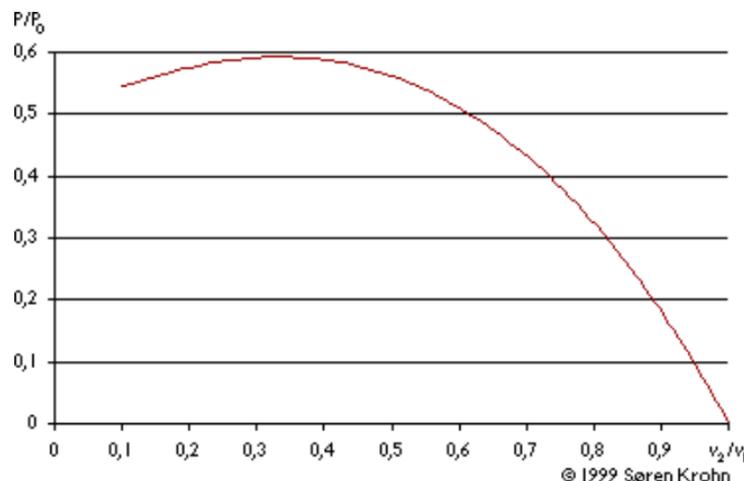
Para optimizar la captación de energía es necesario calcular las dimensiones del álabe mediante el empleo de teorías de aerodinámica.

En este trabajo se utilizó la teoría del límite de Betz, la teoría de Rankine-Froude, el modelo del elemento de pala y la teoría combinada.

##### 4.1. Límite de Betz:

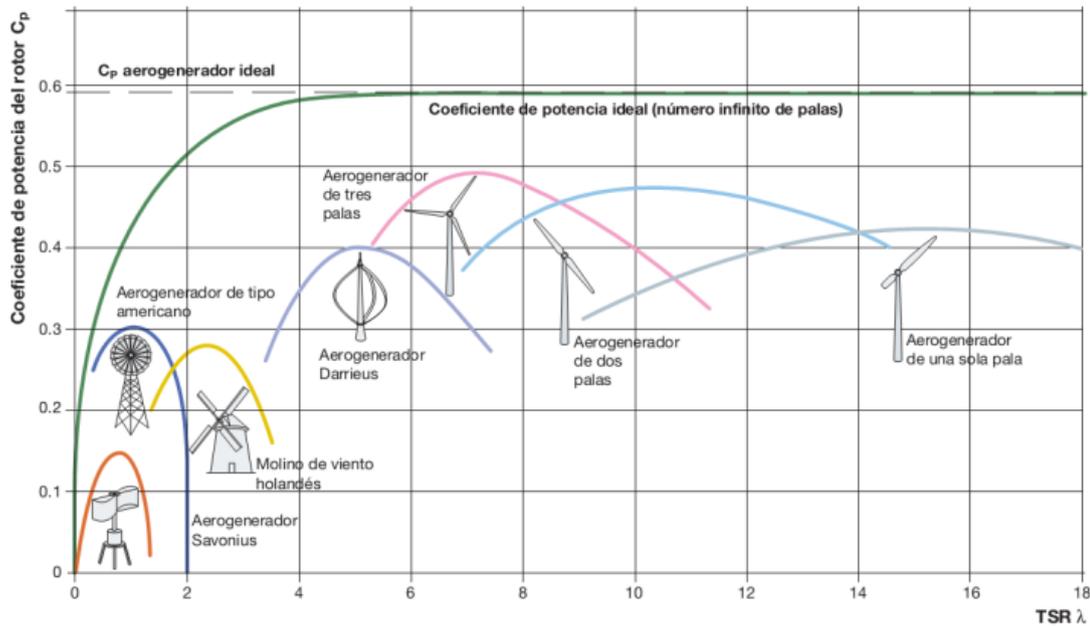
En este desarrollo se plantea que existe una velocidad de salida del alabe para la cual la energía captada es máxima, se plantea el coeficiente de inducción de velocidad axial el cual representa cuanto es la velocidad de salida respecto la de entrada.

El coeficiente de inducción de velocidad según Betz determina el coeficiente de potencia de la máquina, dándose un máximo de 0,59 para un  $1/3$ . Se puede observar en la **Fig. 10**. donde se grafica el coeficiente de potencia vs el coeficiente de inducción de velocidad.



**Fig. 10. Eficiencia vs coeficiente de inducción axial [9].**

Los distintos tipos de turbinas que existen poseen distintos coeficientes de potencia de acuerdo a su forma constructiva y la relación de velocidad de punta. En la **Fig. 11** se observan distintos coeficientes para distintos tipos de turbina a distintas relaciones de velocidad de punta según [10].

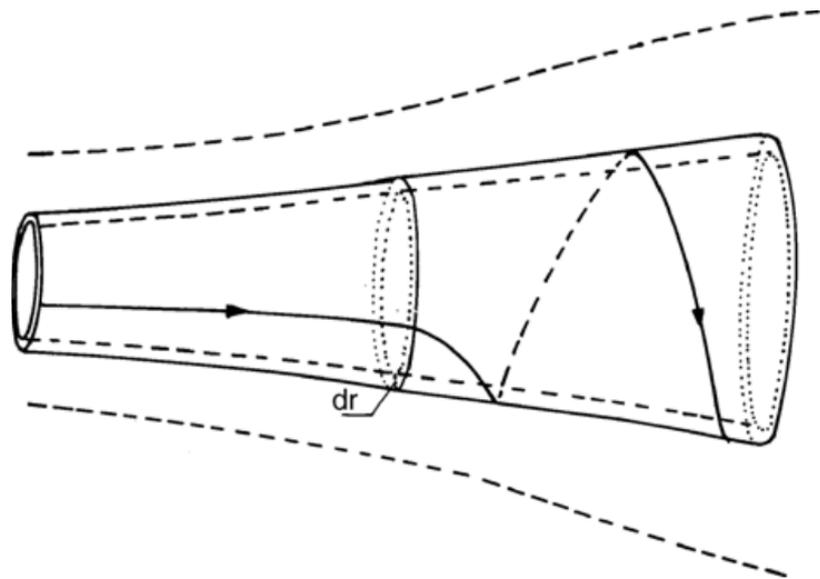


**Fig. 11. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica para diferentes tipos de rotores eólicos [10].**

#### 4.2. Modelo de Rankine-Froude

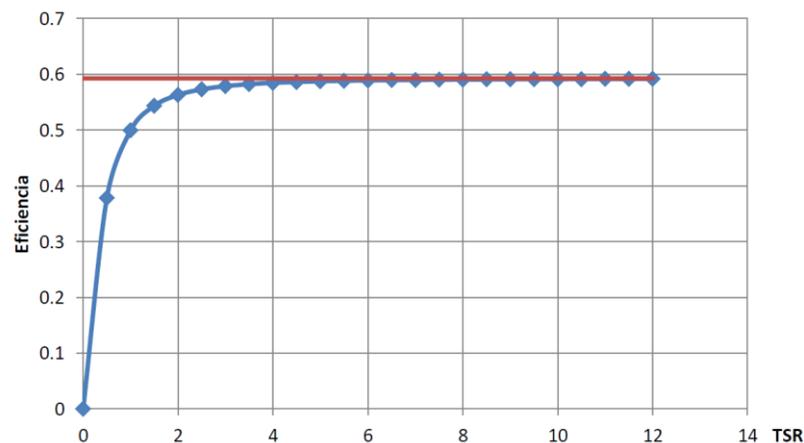
La Teoría de Momento de Disco Actuador es una teoría en dinámica de fluidos que predice el comportamiento de una hélice o turbina, considerándola como un disco plano, según [11].

El disco actuador gira e induce una rotación (en sentido opuesto) sobre el flujo de aire que lo atraviesa. Para obtener una mejor aproximación de la potencia que desarrolla un aerogenerador respecto del análisis hecho por Betz, es necesario considerar dicha rotación del fluido, en la **Fig. 12** se observa de manera esquemática lo explicado.



**Fig. 12. Representación esquemática del modelo de Rankine-Froude [10]**

Si se compara los rendimientos utilizando ambos modelos se puede observar que según Betz el límite teórico máximo es un valor constante independiente de la velocidad de giro, pero Rankine-Froude al considerar la inducción angular al fluido nos dice que el rendimiento también depende de la velocidad de giro (a velocidades menores, mayores pérdidas y menor rendimiento). Esto se observa en las 2 curvas representadas en la **Fig. 13**.



**Fig. 13. Comparación del rendimiento de Betz con el Modelo de Rankine-Froude [10].**

#### 4.3. Modelo de elemento de pala:

Una explicación concisa del modelo es la de Perez, Dasso y Caceres (2014, pág. 127):

“Este modelo fue desarrollado por *William Froude, David W. Taylor y Stefan Drzewiecki*. Consiste en dividir a la pala en infinitos elementos diferenciales y analizar las fuerzas desarrolladas en cada uno, para luego integrarlas a lo largo de toda el aspa y obtener la potencia del aerogenerador, entre otras cosas.

En esta teoría se modela la interacción entre el fluido y las aspas, lo cual no se había hecho en el modelo de *Rankine-Froude*. Para hacer esto, se utilizan coeficientes aerodinámicos y que caracterizan al perfil usado en el aspa.”

A partir del desarrollo de estas modelos obtienen las ecuaciones que nos dan la fuerza de empuje y el torque en las palas.

#### 4.4. Modelo combinado:

Este modelo es la combinación de las dos teorías explicadas hasta ahora: modelo de Rankine-Froude y modelo del elemento de pala.

Con él se puede diseñar por completo el rotor, preestableciendo el número de palas, tipo de perfil y el ángulo de ataque.

De este modelo se obtiene las ecuaciones de diseño necesarias para el cálculo de las dimensiones y forma del álabe, presentadas en la **Tabla 1**:

**Tabla 1. Ecuaciones de diseño**

$c = \frac{8\pi r a'}{Z(V - a')} * \frac{\sin \phi_0^2}{(C_l \cos \phi_0 + C_d \sin \phi_0)} [m]$	1
$b' = \frac{V}{\frac{8\pi r \sin \phi_0^2}{Z * c * (C_l \sin \phi_0 + C_d \cos \phi_0)} + \frac{C_l \cos \phi_0 + C_d \sin \phi_0}{C_l \sin \phi_0 - C_d \cos \phi_0}} [-]$	2
$\tan \phi_0 = \frac{V - a'}{2\pi r n + b'} [-]$	3

Donde:

$c[m]$ : cuerda del alabe.

$b'[-]$ : coeficiente de inducción mutua.

$\phi_0 [^\circ]$ : ángulo de giro.

$a' \left[\frac{m}{s}\right]$ : velocidad entrada afectada por el coeficiente de inducción.

$C_l[-]$ : coeficiente de sustentación.

$C_d[-]$ : coeficiente de arrastre.

$Z[-]$ : numero de alabes.

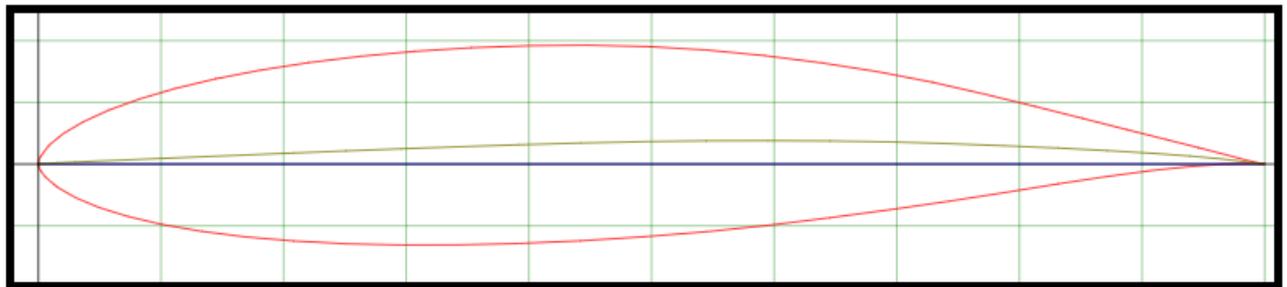
$n \left[ \frac{1}{s} \right]$ :  
velocidad angular.

#### 4.5. Método de resolución:

Para la resolución del sistema de ecuaciones se definió el coeficiente de inducción de 1/3 según el límite máximo en el rendimiento de Betz. En base a esto reducimos una incógnita de nuestro sistema de ecuaciones. Resultando en 3 incógnitas y 3 ecuaciones.

El número de álabes a utilizar se definió en 3 debido a su mejor coeficiente de potencia, la entrega de un torque más suave y menores vibraciones en el rotor.

Se definió el perfil aerodinámico a utilizar NREL S822, presentado en la **Fig. 14**, debido a sus mejores prestaciones. Los datos del mismo se obtuvieron de la página [www.Airfoil.com](http://www.Airfoil.com) [1]. Correspondiendo a un ángulo de ataque de 5°, coeficiente de sustentación 0,8 y coeficiente de arrastre 0,01.



**Fig. 14. Perfil NREL S822 [11]**

La velocidad de giro se obtiene a partir de la relación de velocidad de punta que optimice el coeficiente de potencia como se observa en la **Fig. 11**.

El sistema de ecuaciones debe resolverse para cada distancia del alabe al centro de la turbina. Para ello se define un delta radio de 0,05 r, y se calcula hasta llegar a la punta del álabes.

Una vez definidos los valores independientes mediante sistemas de resoluciones numéricos se calcula los valores necesarios, debido a que las ecuaciones no son lineales. Con ayuda del programa Matlab [13] creamos un script donde se calculan los valores utilizando la función *fsolve* para las distintas distancias del centro del radio.

#### 4.6. Resultados:

Si colocamos un incrementador de velocidad podemos lograr aumentar considerablemente la potencia de nuestra turbina ya que esta es proporcional al cubo con la velocidad de la corriente.

**Tabla 2. Parámetros de la turbina [14].**

Cálculo de Tubo de Venturi			
diámetro entrada (m)	1,20	Área salida (m <sup>2</sup> )	0,79
diámetro salida (m)	1,00	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	1,47
velocidad de entrada (m/s)	1,30	Velocidad de salida (m/s)	1,87
Área entrada (m <sup>2</sup> )	1,13	Potencia	772,83
Longitud	0,37	relación área	0,83

En la **Tabla 3** se colocan los parámetros de diseño ya definidos:

**Tabla 3. Parámetros de diseño [14].**

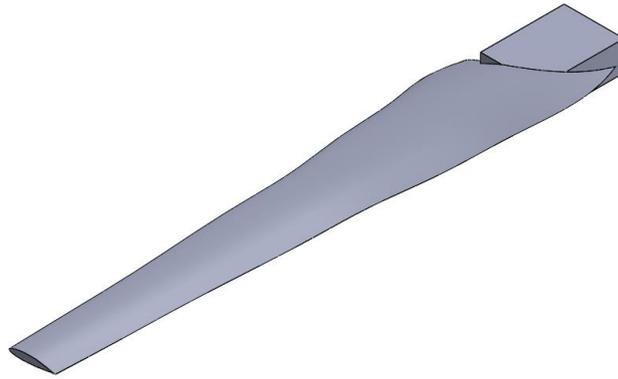
Potencia de salida de la turbina P (W)	772,8334	Relación de velocidad de punta	3
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	ángulo de ataque $\alpha$	5
Velocidad del agua V1 (m/s)	1,872	velocidad de inducción axial	0,624
Coefficiente de potencia (Cp)	0,4382	Diámetro de cubo	0,2
eficiencia $\eta$	0,3	Área (m <sup>2</sup> )	0,785
Numero de palas B	0,5	Velocidad de rotación $w$ (1/s)	11,232
Coefficiente de sustentación CL	0,8	radio de alabes R (m)	0,5
Coefficiente de arrastre Cd	0,01	fracciones de radio $\Delta R$	0,05

Se tabulan los resultados obtenidos en la **Tabla 4**:

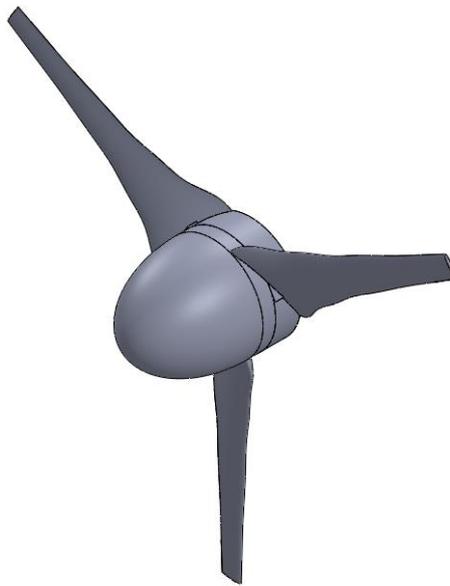
**Tabla 4: dimensiones del alabe [14].**

Elemento	Posición	Cuerda c	Angulo de giro ( $\Phi_0$ )
1	0,1	0,783	21,93
2	0,15	0,0575	15,44
3	0,2	0,0448	11,83
4	0,25	0,0365	9,56
5	0,3	0,0307	8,01
6	0,35	0,0265	6,88
7	0,4	0,0233	6,04
8	0,45	0,02	5,37
9	0,5	0,0187	4,85

Con estos datos se puede realizar un modelado en 3D del alabe mediante la ayuda del software SolidWorks [14]. En la **Fig. 15** y **Fig. 16** se observa el alabe calculado y un ensamblaje de la turbina con 3 palas.



**Fig. 15. Modelado en 3D del alabe [12].**



**Fig. 16. Turbina con 3 alabes [12].**

## **5. Conclusión:**

Este estilo de turbinas nos permite el aprovechamiento de la energía disponible en la velocidad de la corriente de los ríos. Existe un gran potencial en distintos ríos del país. Este tipo de tecnología produce energía limpia con un impacto ambiental mínimo. En si posee un bajo rendimiento, pero es de fácil mantenimiento y puede ser utilizado en zonas alejadas de conexiones a la red.

Es importante aclarar que este trabajo todavía se encuentra en desarrollo.

## 6. Referencias

- [2] Abid Filali Yachou, “Diseño y cálculo de turbina hidrocínética para ríos”, Trabajo de fin de grado (ingeniería), escuela técnica superior de ingeniería civil e industrial, Universidad de la laguna, España, 2015. Disponible en: <<https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/1429>> Acceso en: 18 mayo de 2019.
- [3] José Francisco Arrau Soza, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, “diseño del generador de una turbina hidrocínética de pequeña escala”, Tesis de Maestría, pontificia universidad católica de chile escuela de ingeniería, Santiago de Chile, 2016. Disponible en: <<https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/16881/000675621.pdf?sequence=1>> Acceso en: 18 mayo de 2019.
- [4] DIARIO EL TERRITORIO. “Diseñaron equipos que generan energía en pequeña escala”. El Territorio, Posadas, Misiones, Argentina, 30 noviembre de 2010. Disponible en: <<https://www.eltterritorio.com.ar/disenaron-equipos-que-generan-energia-en-pequena-escala-6182737606961150-et>>. Acceso en: 18 mayo de 2019.
- [5] DIARIO UNO. “Generan energía alternativa con turbina para río de llanura”. Uno Entre Ríos, Entre Ríos, Argentina, 7 octubre de 2013. Disponible en: <<https://www.unoentrierios.com.ar/la-provincia/generar-energia-alternativa-turbina-rio-llanura-n907697.html>>. Acceso en: 20 mayo de 2019.
- [6] INVAP. “Turbina hidrocínética. INVAP”, S. C. de Bariloche, Rio Negro, Argentina, 12 mayo de 2014. Disponible en: <<http://www.invap.com.ar/es/2014-05-12-14-44-54/proyectos/turbina-hidrocinetica.html>>. Acceso en: 19 mayo de 2019.
- [7] SMART TURBINES. Smart Hydro Power, Feldafing, Alemania, diciembre de 2015. Disponible en: <https://www.smart-hydro.de/renewable-energy-systems/hydrokinetic-turbines-river-canal/> >. Acceso en: 19 mayo de 2019.
- [8] VERDANT POWER. Free Flow System, Nueva York, Estados Unidos de América. Disponible en: <https://www.verdantpower.com/free-flow-system> >. Acceso en: 19 mayo de 2019.
- [9] GOOGLE LLC. (2019). Google Earth Pro [Aplicación de Microsoft Windows]. Descargado de: <<https://www.google.es/earth/versions/#earth-pro>>
- [10] Danish Wind Industry Association. Cuadro comparativo Eficiencia vs coeficiente de inducción axial, DWIA, Dinamarca, 1999. Disponible en: <<http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/core.htm>>. Acceso en: 19 mayo de 2019.
- [11] Perez, Manuel N et. al. “Diseño de un Aerogenerador de Baja Potencia”, Trabajo de diseño de ingeniería, Universidad nacional de Mar del Plata, Argentina, 2014. Disponible en: <<https://es.scribd.com/document/396191674/AeroGenerador-de-Baja-Potencia>> Acceso en: 4 de junio de 2019.
- [12] Airfoil Tools, perfil aerodinámico NREL S822. Disponible en: <<http://airfoiltools.com/>>. Acceso en: 19 mayo de 2019.
- [13] Fuente propia
- [14] MathWorks. (2019). MatLab [Aplicación para Microsoft Windows]. Descargado de: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>
- [14] SolidWorks Corp. (2019). SolidWorks [Aplicación para Microsoft Windows]. Descargado de: <<https://www.solidworks.com/es>>