



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA  
TRABAJO DE TÍTULO

## **TURBINA DE VÓRTICE APLICADA A CANALES DE RIEGO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECÁNICA**

AUTOR:

COLLADO AHUMADA, DANIEL

PROFESOR GUÍA

JARA TIRAPEGUI, WILFREDO

SANTIAGO-CHILE

2024

## Autorización para la reproducción del trabajo de titulación

### 1. Identificación del trabajo de titulación

Nombre del alumno: Daniel Alejandro Collado Ahumada

E-mail: Daniel.colladoa@utem.cl

Título de la tesis

“Turbina de vórtice aplicada a canales de riego “

Escuela: Escuela de Mecánica

Carrera o programa: Ingeniería en Mecánica

Título al que opta: Título de Ingeniero en Mecánica

### 2. Autorización de reproducción (seleccione una opción)

- a. Este trabajo de titulación no puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso escrito del autor, exceptuando la cita bibliográfica resumen y metadatos que acreditan al trabajo y a su autor.

Fecha: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

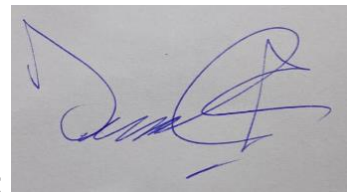
- b. Se autoriza la reproducción total o parcial de este trabajo de titulación con fines académico, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y a su autor.

En consideración de lo anterior, se autoriza su reproducción de forma (marque con una X):

<input checked="" type="checkbox"/>	Inmediata
<input type="checkbox"/>	A partir de la siguiente fecha: _____ (mes/año)

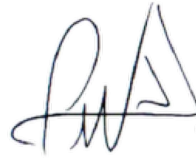
Fecha: 2024-12-04

Firma:



Esta autorización se otorga en el marco de la ley N°17.336 sobre Propiedad Intelectual, con carácter gratuito y no exclusivo para la institución

NOTA OBTENIDA: 6,2

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters that appear to be 'PWA'.

---

Firma y timbre autoridad  
responsable

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Paula, mi compañera de vida, cuyo apoyo incondicional y ánimo constante hicieron posible este logro. A mi hija, quien desde el momento en que nació se convirtió en una fuente infinita de motivación y fortaleza para superar cualquier dificultad. Y a mis padres, porque gracias a ellos soy la persona que soy hoy; por brindarme las oportunidades para seguir mi profesión y alcanzar mis metas.

## RESUMEN

En el siguiente trabajo de título se presenta la utilización del vórtice gravitacional del agua para la instalación de turbinas hidráulicas, un diseño para micro centrales hidráulicas de pasada con una tecnología de gran trayectoria, pero hoy perfeccionada para complementarse con el fenómeno natural del vórtice y así generar energía eléctrica, ya sea en un pequeño canal de riego hasta un gran río. A continuación, se expondrá el estado del arte nacional como internacionales, de cómo se ha utilizado el concepto de vórtice gravitacional desde 1924, hasta el presente donde la empresa "Turbulent" ha desarrollado una tecnología de óptimo funcionamiento y de fácil instalación. Para comprender el potencial y las barreras en el uso de esta tecnología, el trabajo evaluará la instalación de una turbina de vórtice gravitacional en la comuna de Palmilla y se evaluará de manera técnica, económica y ambiental, para obtener como resultado una comprensión total del proyecto y así promover su instalación, con sus ventajas técnicas, económicas y ambientales.

## **ASBTRACT**

The following thesis introduces the use of the gravitational vortex of water for the installation of hydraulic turbines, presenting a design for run-of-river micro-hydropower plants with a well-established technology, now refined to complement the natural phenomenon of the vortex and generate electrical energy. This technology can be applied in settings ranging from small irrigation channels to large rivers. The paper begins by reviewing both national and international state-of-the-art practices, showcasing the historical use of the gravitational vortex concept from 1924 to the present. Notably, the company 'Turbulent' has developed an optimally functioning and easy-to-install technology. To comprehend the potential and barriers in using this technology, the study evaluates the installation of a gravitational vortex turbine in the Palmilla commune. A technical, economic, and environmental assessment will be conducted to gain a comprehensive understanding of the project and promote its installation, emphasizing its economic and environmental advantages.

## **GLOSARIO**

CAPEX: Capital Expenditure

CDEC: Centro de Despacho Económico de Carga

CEN: Coordinador Eléctrico Nacional

CGE: Compañía General de Electricidad

CH: Central Hidráulica

CLP: Peso chileno

CMG: Costo Marginal de Energía

CNE: Comisión Nacional de Energía

DGA: Dirección General de Aguas

DIA: Declaración de Impacto Ambiental

EBITDA: Earnings Before Interests, Taxes, Depreciation and, Amortization

EIA: Evaluación de Impacto Ambiental

ER: Energía Renovable

ERNOC: Energía Renovable No Convencional

FP: Factor de Planta

GA: Generación Anual

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GT: Generación Teórica

Hb: Altura Bruta

Hn: Altura Neta

MCHP: Micro Central Hidráulica de Pasada

MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio

MOP: Ministerio de Obras Públicas

OAECA: Organismos de Administración del Estado con Competencia Ambiental

PE: Potencial Eléctrico

PI: Potencia Instalada

Q: Caudal

SEN: Sistema Eléctrico Nacional

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental

SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

TIR: Tasa Interna de Retorno

TVG: Turbina de Vórtice Gravitacional

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

USD: Dólar Estadounidense

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María

VAN: Valor Actual Neto

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	4
RESUMEN.....	5
ASBTRACT.....	6
GLOSARIO .....	7
ÍNDICE.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE TABLAS .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
Objetivo General .....	19
Objetivos específicos .....	19
CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	20
1.1    La turbina de vórtice .....	21
1.2    Potencia eléctrica de una central hidráulica .....	24
1.3    Comportamiento del vórtice gravitacional libre .....	27
CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	29
CAPITULO 3: EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN PROYECTO CON TURBINA DE VÓRTICE.....	37
3.1    Localización del proyecto .....	37
3.2    Definiciones técnicas del proyecto .....	40
3.3    Especificaciones del equipo .....	42
3.4    Instalación del equipo.....	45
CAPITULO 4: MODELO DEL PROYECTO TURBINA DE VÓRTICE .....	47

4.1	Obra civil proyecto turbina de vórtice gravitacional .....	50
4.2	Instalación y puesta en servicio .....	53
CAPITULO 5: EVALUACIÓN ECÓNOMICA DE UN PROYECTO CON TURBINA DE VÓRTICE .....		55
5.1	Costos asociados .....	56
5.2	Gastos de operaciones.....	58
5.3	Mercados identificados.....	59
5.3.1	Negocio de generación.....	61
5.3.2	Bonos de carbono .....	62
5.3.3	Aporte Ley ERNC .....	63
5.4	Ley Net Billing .....	64
5.5	Parámetros de la evaluación económica.....	67
5.6	Flujo de caja .....	69
5.7	Análisis de sensibilidad .....	70
5.7.1	Inversión del proyecto .....	71
5.7.2	Factor de Planta .....	71
5.7.3	Precio de Venta de energía.....	72
CAPITULO 6: EVALUACIÓN AMBIENTAL PROYECTO TURBINA DE VÓRTICE .....		74
6.1	Regulación medioambiental .....	74
6.2	Impactos del proyecto .....	75
6.3	Carta consulta de pertinencia .....	76
CAPITULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		78
7.1	Evaluación Técnica.....	78

7.2	Evaluación Económica .....	79
7.3	Evaluación Ambiental .....	80
7.4	Oportunidades y Barreras.....	80
7.4.1	Oportunidades .....	80
7.4.2	Barreras.....	81
	CONCLUSIONES .....	83
	RECOMENDACIONES .....	86
	BIBLIOGRAFÍA.....	88
	ANEXOS.....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estado de madurez de tecnologías para energías renovables .....	15
Figura 2 Modelo aplicado de la turbina de vórtice.....	17
Figura 3 Tipo de turbinas hidráulicas .....	20
Figura 4 Turbina de vórtice .....	22
Figura 5 Vórtice gravitacional.....	22
Figura 6 Esquema de instalación de una TVG.....	23
Figura 7 Esquema de una central eléctrica.....	24
Figura 8 Esquema de generación eléctrica.....	25
Figura 9 Líneas de corriente. (a) vórtice libre (irrotacional), (b)vórtice forzado (rotacional).....	27
Figura 10 Líneas de trayectoria .....	28
Figura 11 Hydraulic Machine F. Nagler.....	29
Figura 12 Turbo Machine M. Reiffenstein .....	30
Figura 13 Power Generating Water Turbine D. Sanders .....	31
Figura 14 Central de vórtice gravitacional Zotlöterer .....	32
Figura 15 Turbulent Gravitational Vortex Water Turbine G. Slachmuylders .....	33
Figura 16 Equipo generador Turbulent .....	34
Figura 17 Turbina de Vórtice Gravitacional, micro hidroeléctrica potencia de 15kW, Doñihue Chile .....	36
Figura 18 Vista aérea de la localización Palmilla .....	38
Figura 19 Curva estimada de caudal medio para el año 2022.....	39
Figura 20 Modelos comerciales de Turbulent. ....	40
Figura 21 Tecnología turbina Turbulent .....	43
Figura 22 Construcción del caracol.....	45
Figura 23 Bocatoma El Huicano .....	46
Figura 24 Modelo de la Micro Central Hidráulica de pasada con tecnología Turbulent.....	48

Figura 25 Obra civil de Bypass .....	49
Figura 26 Obra civil de rebalse .....	50
Figura 27 Confinamiento de armadura vista superior .....	51
Figura 28 Molde de encofrado para el hormigón .....	52
Figura 29 Revestimiento estructura de caracol.....	53
Figura 30 Instalación de la TVG.....	54
Figura 31 Costos de una central hidráulica.....	57
Figura 32 El mercado eléctrico en Chile .....	60
Figura 33 Teoría de equilibrio de costos marginales .....	61
Figura 34 Funcionamiento NetBilling .....	65
Figura 35 Tarifas para conexión de equipamiento de Generación Residencial	66
Figura 36 Patrón de flujo.....	92
Figura 37 Plano de Plano de Modelo para Micro central hidráulica de pasado utilizando la tecnología Turbulent modelo 5 KW .....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Potencial de centrales hidráulicas en canales de riego .....	16
Tabla 2 Detalle figura 8 .....	25
Tabla 3 Catastros centrales TVG de la compañía Turbulent .....	35
Tabla 4 Especificaciones técnicas turbina Turbulent modelo 5kW .....	44
Tabla 5 Detalle de mantenimiento Turbina Turbulent .....	44
Tabla 6 Personal en fases de la central .....	46
Tabla 7 Gasto de capital para la MCHP .....	67
Tabla 8 Parámetros de la evaluación económica (valores supuestos) .....	68
Tabla 9 Flujo de caja proyecto Turbina de Vórtice .....	69
Tabla 10 Variación de inversión en flujo de caja .....	71
Tabla 11 Variación de Factor de planta en flujo de caja .....	72
Tabla 12 Variación tarifa de servicio en flujo de caja .....	73

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de título, se expondrá la aplicación de una Energía Renovable (ER), una microcentral hidroeléctrica de pasada. Con esta tecnología se busca aprovechar el recurso hídrico de esteros o canales de regadíos, cuyos caudales no fueron considerados anteriormente para proyectos energéticos, debido, a que lo que se buscaba eran grandes fuentes hídricas para importantes centrales hidroeléctricas de pasada y/o de embalse, en general, asociadas a una represa. Actualmente, las grandes centrales hidráulicas se encuentran con períodos de aprobación e instalación de 10 o más años. Hoy en día la demanda energética sigue aumentando, mientras que las naciones se dirigen hacia un mundo más sustentable, evitando el uso de carbón y combustibles fósiles, y promoviendo el uso de las ER.

El propósito de este trabajo es promover el interés en esta tecnología hidráulica, con un formato más pequeño y simple, sin los impactos negativos de las grandes centrales. Lo anterior, orientado a abastecer comunidades rurales y vender el excedente a la red de distribución de electricidad. Entre los distintos tipos de ER, la tecnología para generar energía en base a la hidráulica es la más madura, como se muestra en la figura 1.

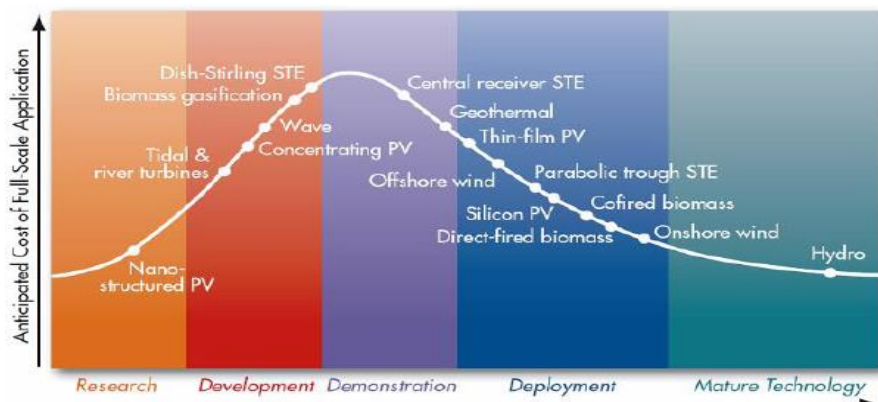


Figura 1 Estado de madurez de tecnologías para energías renovables  
Fuente: Renewables: A promising coalition of many (2018)

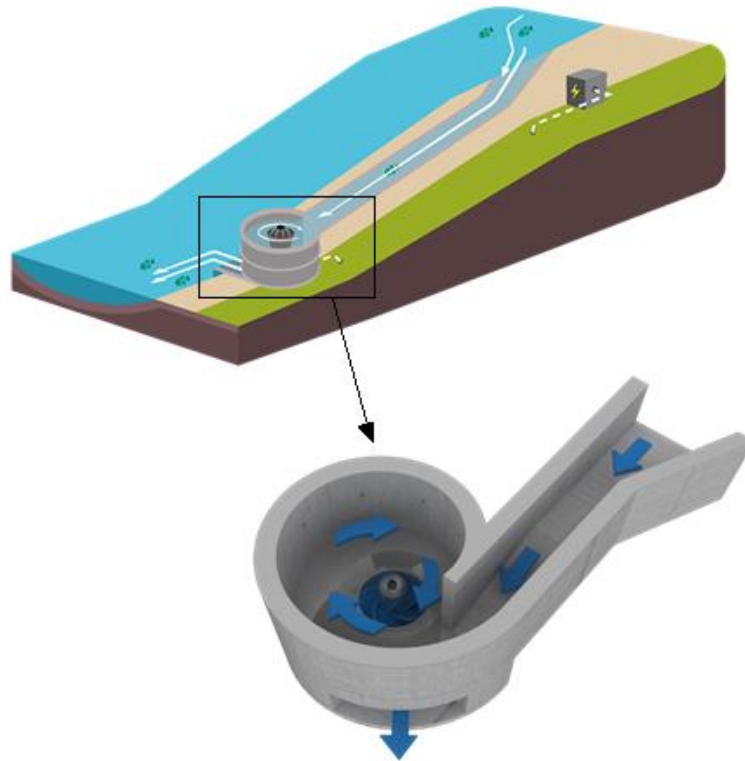
Según un estudio desarrollado por el profesor Jaime Espinoza (UTFSM), existe un gran potencial para instalar minicentrales hidráulicas en canales de riego.

*Tabla 1 Potencial de centrales hidráulicas en canales de riego*

<b>Lugar de Chile</b>	<b>Potencia Instalable [MW]</b>
III Región	16,2
IV Región	62,7
V Región	44,1
VI Región	179,5
VII Región	226,9
VIII Región	265,6
IX Región	34,6
RM	36,5
<b>Total</b>	<b>866,1</b>

*Fuente: Prof. -Ing. Jaime Espinoza S. director CIE-USM*

Como se muestra en la tabla 1, existe una gran oportunidad para explotar los canales de regadíos, de modo que, para adaptarse a cualquier demanda o disposición de caudal o condiciones geográficas, se propone la Turbina de Vórtice, para una central hidroeléctrica de pasada donde la estructura de caracol proporciona una velocidad angular al agua y así tener un mejor ángulo de ataque al llegar a los álabes del rodete, como se muestra en la figura 2. De este modo, no se interrumpe el flujo de agua, y tampoco afecta la vida acuática. Las ventajas de estas instalaciones es que no requieren grandes caudales y saltos de agua, las obras civiles son simples y se pueden obtener potencias de 5 kW hasta 70 kW.



*Figura 2 Modelo aplicado de la turbina de vórtice  
Fuente: Turbulent (2018)*

El proyecto a desarrollar se ubicará en la comuna de Palmilla ubicada en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, de modo de abarcar poblados rurales o ciudades pequeñas que se dediquen a la producción de alimentos o forestales, ya que requieren estar cercanos a una corriente de agua y así ofrecerles la turbina de vórtice, pues una vez instalada los costos de mantención son relativamente bajos y puede estar en funcionamiento el 90% del año, como indican sus creadores (Verreydt & Slachmuylders, 2015).

Para la instalación de una turbina hidráulica, es necesario solicitar un derecho de agua de no consuntivo, este proceso puede ser complejo y requerirá de la

aprobación por parte de la Dirección General de Aguas (DGA) organismo dependiente del Ministerio de Obras Públicas.

Por lo anterior, este proyecto está pensado para un público objetivo, comunidades que ya cuentan con los derechos de uso de agua, especialmente las asociaciones de canalistas (regantes), las cuales tienen el derecho de uso consuntivo, por lo que cuentan con las instalaciones necesarias (bocatomas y canales) para captar y transportar los flujos de agua.

En la primera parte del trabajo, se especificarán los conceptos teóricos de la turbina y sus principales componentes, el comportamiento del vórtice como tal y las magnitudes de interés para determinar el desempeño de la TVG. Además, se revisará el estado del arte, tanto nacional como internacional, de tecnologías y diseños que implementan el vórtice de agua.

Posteriormente, se desarrollará un proyecto en la comuna de Palmilla, para evaluar las oportunidades y barreras de esta tecnología en canales de riego. Para determinar la viabilidad del proyecto se desarrollarán las siguientes evaluaciones:

- *Evaluación Técnica*
- *Evaluación Económica*
- *Evaluación Ambiental*

### **Objetivo General**

Realizar una evaluación técnica, económica y ambiental para la aplicación de la Turbina de Vórtice en canales de riego.

### **Objetivos específicos**

- DESARROLLAR EL MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA “TURBINA HIDRÁULICA DE VÓRTICE” Y EL ESTADO DEL ARTE, TANTO NACIONAL COMO INTERNACIONAL, DE ESTA TECNOLOGÍA.
- DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UN PROYECTO DE APLICACIÓN DE LA “TURBINA HIDRÁULICA DE VÓRTICE”.
- REALIZAR LA EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL PROYECTO “TURBINA HIDRÁULICA DE VÓRTICE” EN LA LOCALIDAD DE PALMILLA
- DETERMINAR LAS OPORTUNIDADES Y BARRERAS, CON LA FINALIDAD DE PROMOVER UN MAYOR DESARROLLO DE LA “TURBINA DE VÓRTICE” EN CHILE.

## CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Desde tiempos ancestrales, la utilización de corrientes de aguas como fuente de energía tenía la finalidad de obtener potencia mecánica, para ser utilizada directamente a través de engranes para moler grano o aserrar madera por mencionar algunas aplicaciones. Hoy la potencia mecánica que entrega la turbina es utilizada para la generación de energía eléctrica, a través de un generador acoplado a la misma.

Existen dos tipos de turbinas hidráulicas; de Acción o de Impulso y las de Reacción (figura 3).

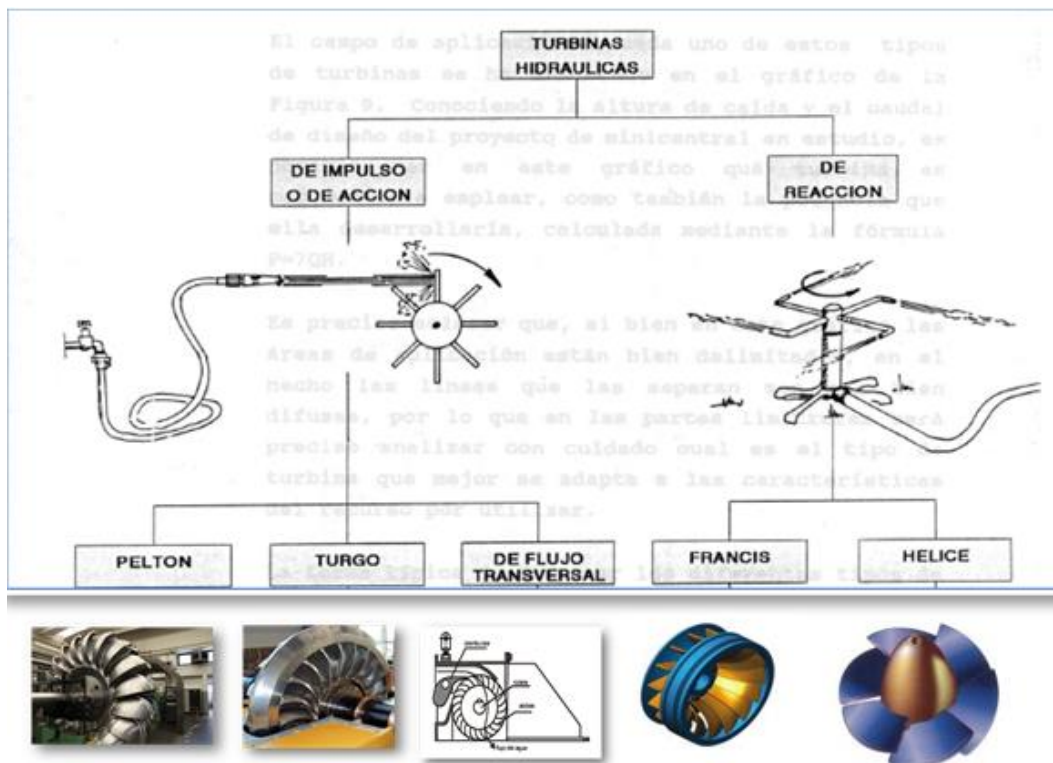


Figura 3 Tipo de turbinas hidráulicas  
Fuente: Jara W. (1998)

## 1.1 La turbina de vórtice

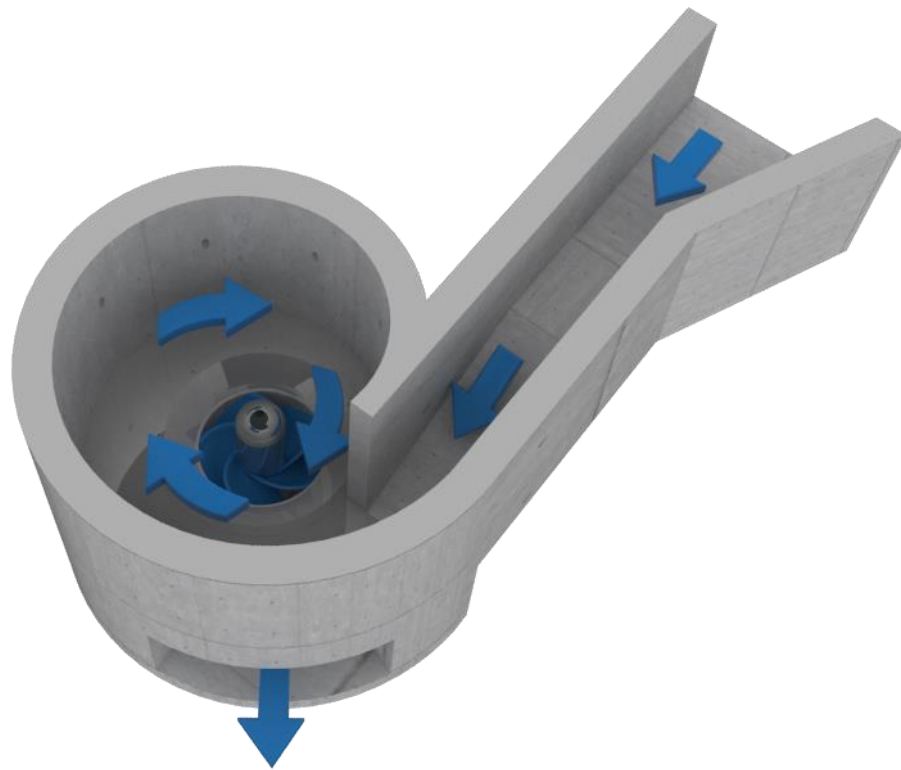
La turbina de vórtice es de reacción del tipo hélice y se utiliza en proyectos de microcentrales de pasada como se muestra en la figura 4. La estructura de concreto se construye para instalar la turbina y dirigir el flujo de agua, proporcionando a las partículas de agua un aumento de velocidad al reducir la sección transversal en comparación a la entrada y posteriormente, cuando el agua ingresa a la sección circular en forma de caracol, la velocidad tangencial de las partículas se convierte en angular, a medida que fluye el agua al difusor, ésta experimenta un aumento de presión y a su vez de energía cinética.

Los componentes básicos de la turbina son los siguientes:

- **DISTRIBUIDOR:** ES LA ESTRUCTURA QUE REGULA EL CAUDAL DE ENTRADA A LA TURBINA Y LES PROPORCIONA A LAS PARTÍCULAS DE AGUA UNA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DESEADA PARA IMPACTAR DE LA MANERA ÓPTIMA (MÍNIMAS PÉRDIDAS) EL RODETE
- **CARACOL:** ES EL ELEMENTO QUE TIENE POR OBJETO CAMBIAR LA DIRECCIÓN DEL FLUJO PROVENIENTE DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA.
- **RODETE:** ES EL COMPONENTE CONECTADO AL EJE MECÁNICO, SU OBJETIVO ES TRANSFORMAR LA ENERGÍA HIDRÁULICA EN MECÁNICA, ESTO SE LOGRA POR MEDIO DE UNA RUEDA MÓVIL PROVISTA DE ÁLABES.
- **DIFUSOR:** ES LA PARTE DE LA ESTRUCTURA CUYO OBJETIVO ES PERMITIR UNA FÁCIL SALIDA DEL AGUA, DISMINUYENDO LAS PÉRDIDAS EN FORMA DE ENERGÍA CINÉTICA.

La turbina en estudio se denomina de vórtice gravitacional, existen dos tipos: el vórtice forzado y el vórtice libre, el primero consiste en un contenedor en donde se agrega energía con tal de hacer girar el líquido para producir el vórtice.

En cambio, el vórtice libre, es el fenómeno que ocurre naturalmente cuando un fluido es vaciado por la superficie inferior de un contenedor, por ejemplo, en la ducha cuando el agua se va por el desagüe (figura 5).



*Figura 4 Turbina de vórtice  
Fuente: Turbulent (2018)*



*Figura 5 Vórtice gravitacional  
Fuente: webdowntec.wordpress.com (2018)*

La central con la turbina de vórtice gravitacional (TVG), como se mencionó anteriormente, es del tipo de pasada esto significa que el flujo de agua no es frenada o contenida por una estructura de represa o de contención. Como se muestra en la figura 6, en un río o canal se instala una bocatoma con una barrera (reja) que frenará cualquier tipo de basura o residuo sólido de gran tamaño que pueda ingresar a la turbina, sin embargo, sí permite el ingreso y salida de vida acuática. Como el proyecto está dirigido a canales artificiales, la central con todos sus componentes se construye en paralelo al canal.

Es necesario realizar un estudio del caudal promedio que se puede obtener en el lugar donde se desea instalar la central, posteriormente, se puede determinar las características generales de la instalación y el potencial eléctrico que se puede generar.

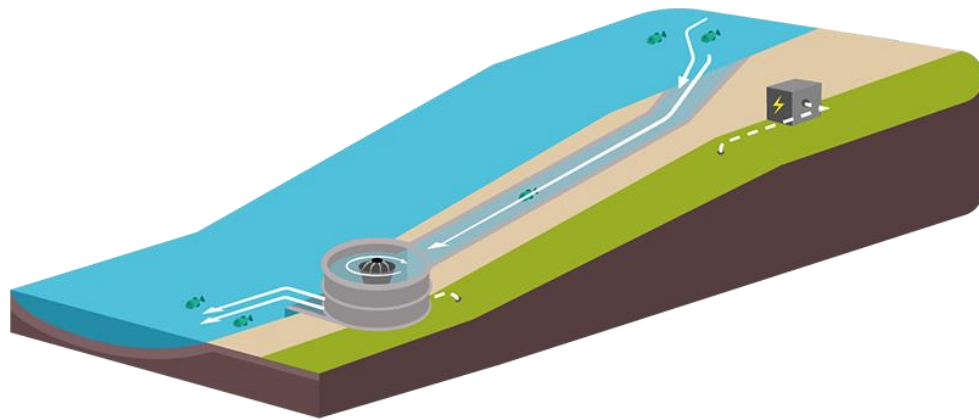


Figura 6 Esquema de instalación de una TVG  
Fuente: Turbulent (2018)

## 1.2 Potencia eléctrica de una central hidráulica

Para determinar la producción de la TVG, se deben especificar las magnitudes que interactúan desde el flujo de agua, hasta la generación de electricidad, para ello en la figura 7 se pueden observar las condiciones de operación de una central hidráulica. Una fuente de agua es dirigida por una estructura, para llevar un caudal  $Q$  con una diferencia de altura bruta ( $H_b$ ).

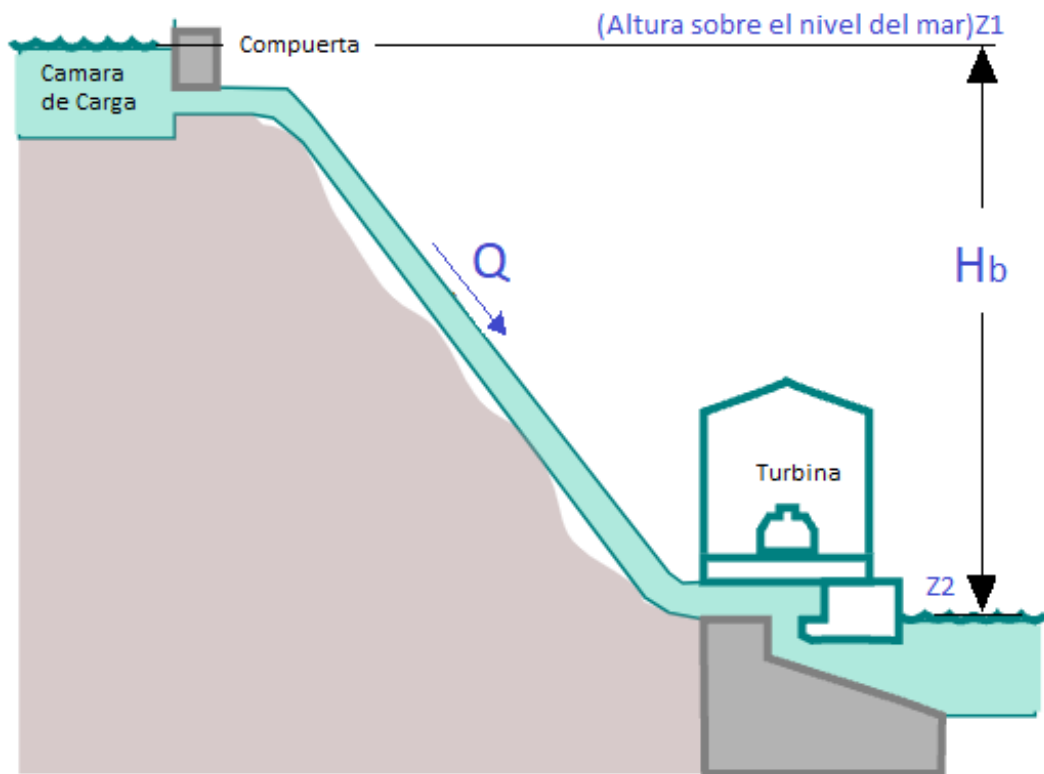


Figura 7 Esquema de una central eléctrica  
Fuente: Juan Villalobos (2019)

La turbina se encarga de transformar la potencia hidráulica en potencia mecánica utilizando un rodete, como se muestra en la figura 8, posteriormente la

energía mecánica es transmitida a través de un eje al generador, donde se transformará en potencia eléctrica.

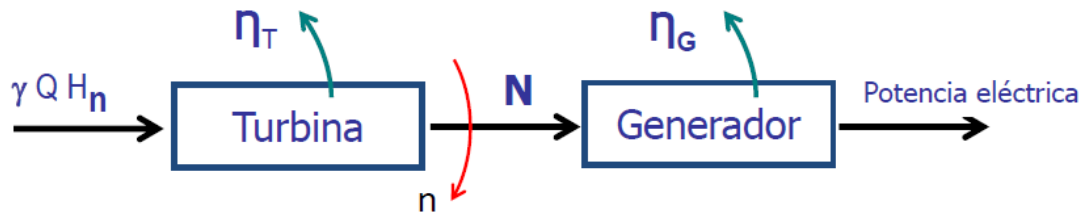


Figura 8 Esquema de generación eléctrica  
Fuente: Prof. M.Sc. Ing. Wilfredo Jara (UTEM)

Donde:

Tabla 2 Detalle figura 8

Q[m <sup>3</sup> /s]	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Hn[m]	n[RPM]	N[W]	P.E.[W]	$\eta$
Caudal	Peso específico del agua	Altura neta	Velocidad sincrónica	Potencia mecánica	Potencia Eléctrica	Rendimiento

Fuente: Elaboración propia en base a cátedra de Maquinas Hidráulicas (Jara. W)

$$N = \gamma Q H_n * \eta_T \quad (1) \quad ; \quad P.E. = N * \eta_G \quad (2)$$

Ya que la transformación de energía no ocurre sin pérdidas, tanto la turbina como el generador, tendrán eficiencias definidas por sus respectivos proveedores, pero se pueden considerar eficiencias bastante altas, ya que, como se indica en el libro (Gulliver & Mays, 1991) se indica que “Los generadores hidroeléctricos son conocidos por tener eficiencias excepcionalmente altas, a menudo superiores al 90%. Esto se debe a la alta densidad de energía del agua en movimiento, que se convierte en energía eléctrica con una eficiencia muy alta a través de turbinas y generadores diseñados con precisión”, es por ello que se consideran valores medios en rangos normales de operación, el rendimiento de la turbina ( $\eta_T$ ) y el generador ( $\eta_G$ ) se pueden estimar en 90% y 98% respectivamente.

La altura neta ( $H_n$ ) representa la energía disponible a la entrada de la turbina y para el caso de un proyecto hidroeléctrico se determina con la altura bruta ( $H_b$ ) y las pérdidas en la aducción. De esta forma se tiene (libro Máquinas Hidráulicas W. Jara, 1998) que la altura neta puede ser determinada por la siguiente ecuación:

$$H_n = H_b - (J_e + j_s) \quad (3)$$

Donde  $J_e$  y  $j_s$ , representan las pérdidas de carga entre la captación del agua y la entrada a la turbina; y entre la salida de ésta y la entrega al curso de agua, respectivamente. Las pérdidas de carga en un canal revestido pueden ser influenciadas por varios factores, tales, como su longitud, rugosidad, sección transversal o caudal. De las variables indicadas, la de mayor relevancia es la rugosidad del canal, o el coeficiente de rugosidad de Manning en canales revestidos. En el caso de una central hidráulica se utilizan revestimientos de canal que signifiquen una mínima pérdida de carga de energía, utilizando superficies duras y lisas, de acuerdo a (Mery, Hidraulica aplicada al diseño de obras, 2013) se indica en su texto que el coeficiente de Manning para el concreto liso es de 0,010-0,013, que de acuerdo con la experiencia de proyectos hidroeléctricos (validado por el profesor guía) un valor aceptable de la pérdida total de las aducciones corresponde a un 5% de la altura bruta, por lo tanto, la altura neta equivale a un 95% de la altura bruta.

Aplicando los valores de eficiencia indicados, en las fórmulas (1), (2) y (3) (Anexo 1) se puede obtener la ecuación (4). La potencia eléctrica (P.E.) para estudios de factibilidad de proyectos hidroeléctricos, esta dada por la siguiente ecuación.

$$P.E. = 8,2 * Q * H_b \quad (4)$$

### 1.3 Comportamiento del vórtice gravitacional libre

El movimiento de las partículas de agua en el vórtice puede ser descrito por los patrones de flujo, como se observa en el libro de Mecánica de Fluidos, (Munson, Young, Okiishi, & Huebsch, 2009), el movimiento del fluido tiene el comportamiento representado en la figura 9, donde las líneas de corrientes son círculos concéntricos.

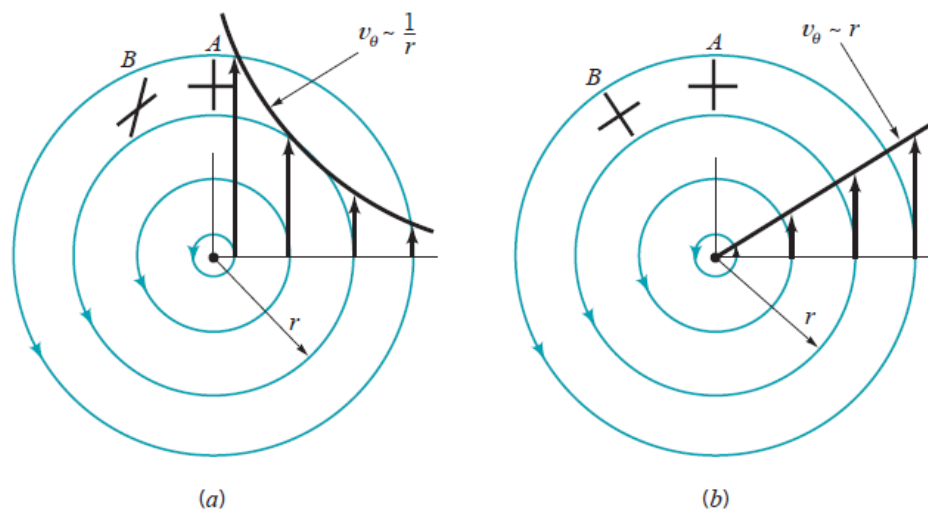
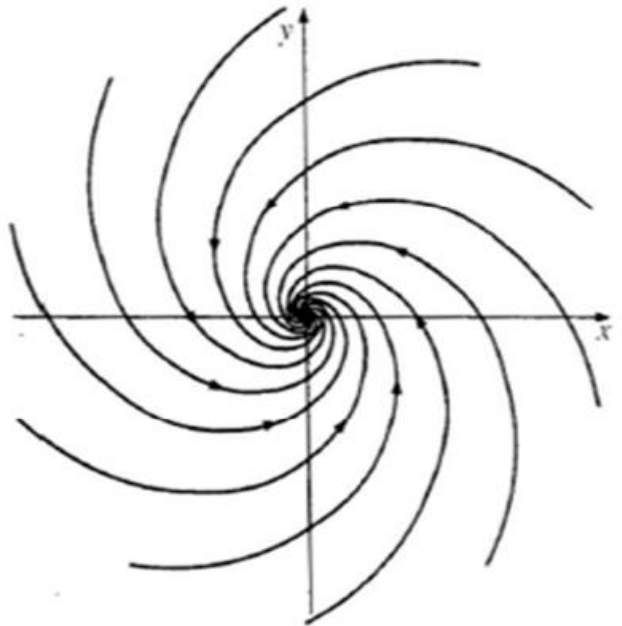


Figura 9 Líneas de corriente. (a) vórtice libre (irrotacional), (b) vórtice forzado (rotacional)  
Fuente: Fundamentals of fluid mechanics (Munson-Young) (2009)

El vector de velocidad  $v_\theta$  es tangencial a las curvas que representan las líneas de corriente, como se muestra en la figura 9, parte (a), las velocidades aumentan su velocidad a menor radio del centro, matemáticamente hablando, cuando se refiere al centro se habla de una singularidad donde la velocidad es infinita. Un concepto matemático comúnmente asociado al movimiento del vórtice es la “circulación”  $\Gamma$ , la cual se define como la integral de velocidad tangencial, para el caso del vórtice libre,  $\Gamma = 2\pi K$ , donde  $k$  es una constante asociada a los círculos concéntricos en las líneas de corriente.

En las líneas de trayectorias del vórtice se puede apreciar la trayectoria real del recorrido de las partículas en algún punto en el tiempo, la figura 10 representa los patrones del flujo del vórtice libre. Mayor detalle en Anexo 2.



*Figura 10 Líneas de trayectoria*  
*Fuente: Mecánica de Fluidos (Cengel) (2012)*

## CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE

El fenómeno del vórtice siempre fue estudiado para determinar su comportamiento desde la mecánica de los fluidos, mencionado en el marco teórico, el concepto que interesa son los vórtices gravitacionales libres, los que ocurren naturalmente cuando el agua sale del sistema desde la superficie inferior. Unas de las primeras aplicaciones datan de 1924, donde el estadounidense Forrest Nagler (Estados Unidos Patente nº 550.612, 1924), sin prestar mucha atención en la estructura, sino más bien aprovechar el fenómeno del vórtice, diseña su “máquina hidráulica” con el objetivo de proveer a la sociedad con una tecnología que es simple y económica en su construcción y eficiente de operar, un simple distribuidor cuadrado con un agujero para generar el vórtice y ahí posicionar un rotor (figura 11).

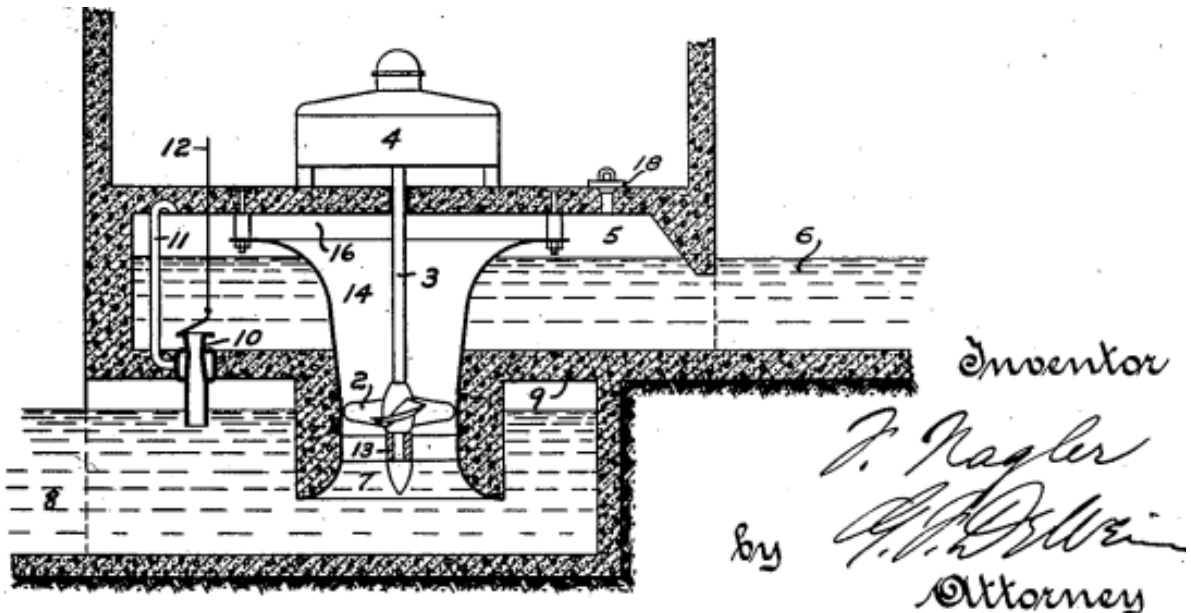


Figura 11 Hydraulic Machine F. Nagler  
Fuente: United states patent office (1924)

Posteriormente, en 1936, el austriaco Manfred Reiffenstein (Austria Patente nº 699.964, 1936), estudiando el diseño de las turbinas Kaplan, observó el eficiente uso de alabes ajustables en disposición de caracol que controlan y optimizan el flujo de agua al ingresar al rodete, por lo que su diseño incorpora la estructura de caracol para el uso del vórtice en una central hidráulica, entregando un flujo liso, que no presentará pérdidas de energía por turbulencia, a un ángulo de admisión definido. La eficiencia del diseño será buena, mientras se mantengan las condiciones de trabajo óptimas, es decir el caudal nominal de operación constante y la altura neta adecuada (figura 12).

**May 19, 1936. M. REIFFENSTEIN 2,041,570**

**TURBO MACHINE**

**Filed Nov. 27, 1933**

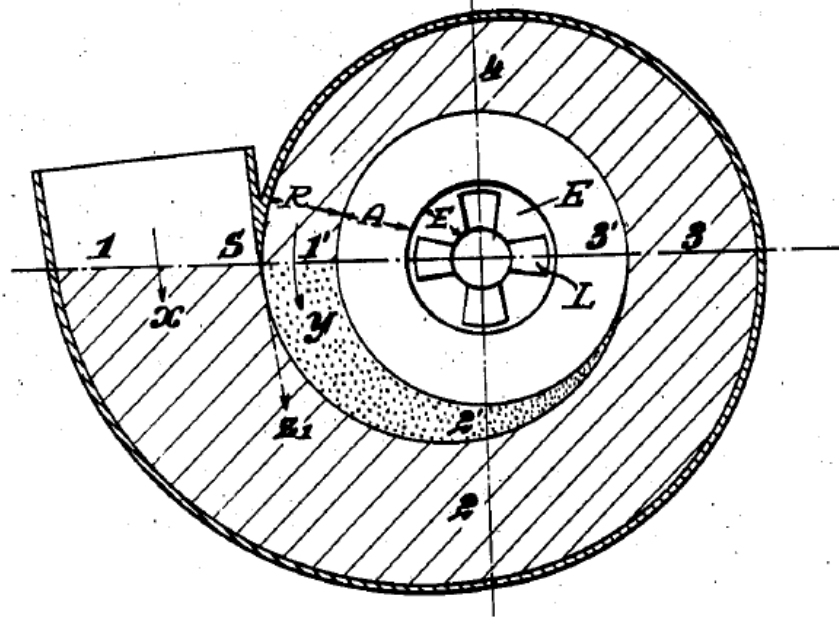


Figura 12 Turbo Machine M. Reiffenstein  
Fuente: United states patent office (1936)

La tecnología como tal, no experimentó cambios relevantes por los siguientes años, hasta que, en 1978, dos inventores Sanders y Zotlöterer, decidieron innovar y promover el uso de esta tecnología como una oportunidad de utilizar ríos o canales de baja altura y caudal.

El estadounidense Davis Sanders (Estados Unidos Patente nº 734.754, 1978), propone un formato más industrial, el cual requiere un caudal entubado como se observa en la figura 13, el diseño cuenta con múltiples canales guías formados por una serie de placas curvas, donde cada canal disminuye su sección transversal, para que luego cantidades iguales de agua converjan en el rodete, generando el vórtice gravitacional, su diseño denominado “*Power Generating Water Turbine*”, cuenta además con dos rodetes, uno en la descarga directa de los canales y otro, más abajo donde la velocidad del vórtice es más concentrada y óptima. Posteriormente en el difusor, se diseña una salida eficiente del agua, aumentando el área de sección transversal de la tubería rectangular, así se evitará el retorno del agua, el cual puede interferir con el giro del rodete.

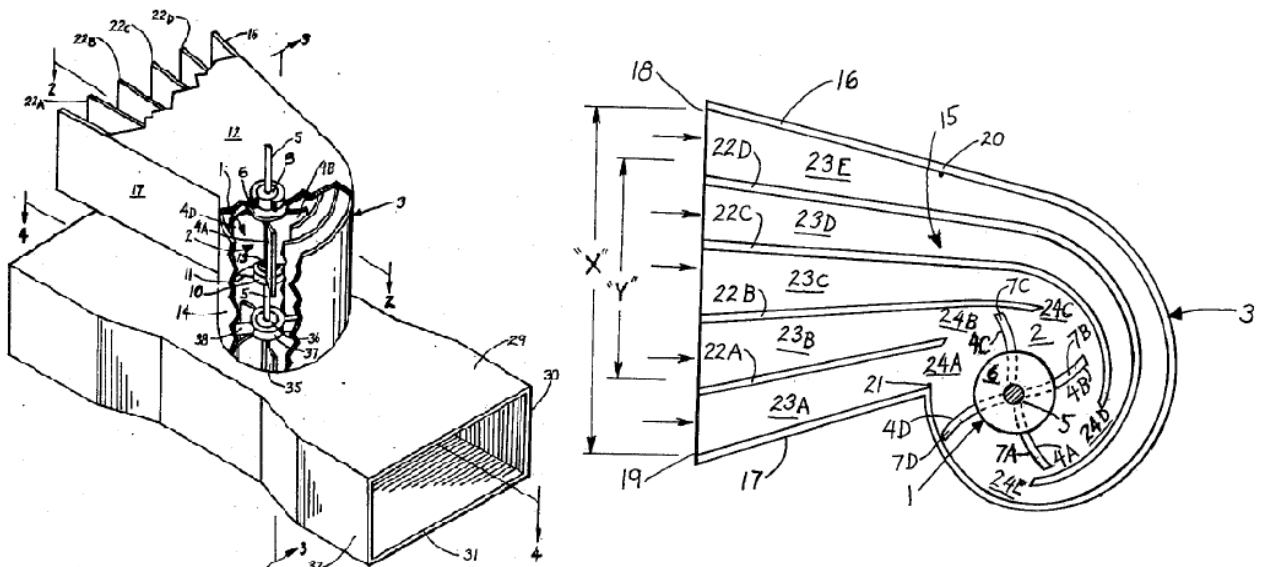
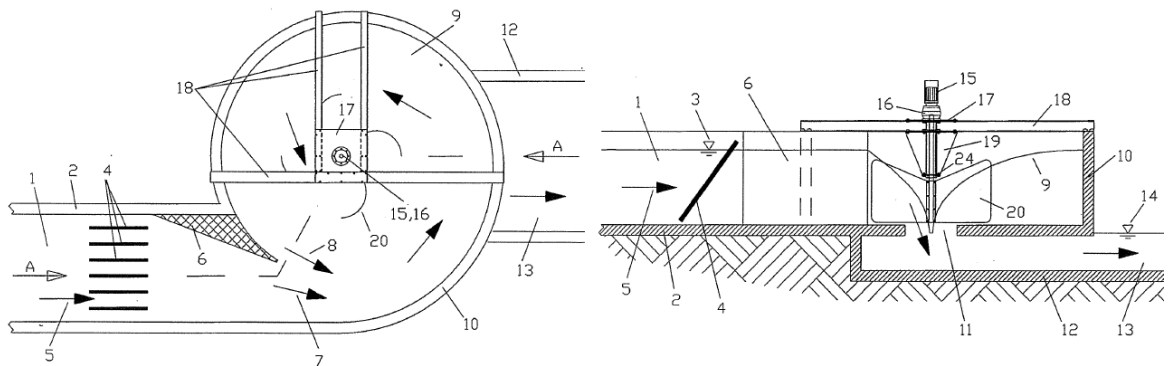


Figura 13 Power Generating Water Turbine D. Sanders  
Fuente: United states patent office (1978)

Hoy en día, un diseño que ha demostrado ser funcional y simple ha sido el postulado por el austriaco Franz Zotlöterer (Suiza Patente nº CH 699.133 B1, 1978), (figura 14) el cual se asemeja más al estudiado en este trabajo, Franz ha seguido innovando su invento, en el último diseño publicado en 2004, perfecciona la tecnología y así descubre nuevas propiedades al utilizar el vórtice gravitacional, a diferencia de los otros diseños, el suyo funciona con una baja altura, desde 0,7 m, utiliza la energía cinética del vórtice artificial, moviendo grandes cantidades de agua, utiliza un rotor que girará a baja velocidad pero con un gran torque, la velocidad de rotación será aumentada por un sistema de engranes.



*Figura 14 Central de vórtice gravitacional Zotlöterer  
Fuente: Contrato de protección de patente Suiza y Liechtenstein (1978)*

Franz postula que su invento, no tiene impacto ambiental negativo, más bien tiene un impacto positivo, esto se debe en principio porque al utilizar grandes cantidades de agua y una baja rotación del rotor, es seguro para la vida acuática pasar a través de la central, además indica que el vórtice oxigena el agua del flujo, esto significa que: el agua estará más oxigenada y mezclada, lo que garantiza un hábitat más sano para los peces, reduce el florecimiento de algas, disemina contaminantes homogéneos con el agua, por lo que microorganismos pueden fácilmente descomponer dichos contaminantes.

La turbina de interés en este trabajo es la “*Turbulent Gravitational Vortex Water Turbine*”, diseñada por el ingeniero belga Geert Slachmuylders en 2015 y publicada el 2017 (Bélgica Patente nº WO 2017/ 09793, 2017), con un diseño similar en estructura a la de Zotlöterer, a diferencia de que, como se muestra en la figura 15, el rodete se encuentra en la salida, lugar donde la velocidad y presión de las partículas de agua son mayores, al centro del tanque en la salida existe una forma cónica que facilita el impacto del vórtice en el rodete.

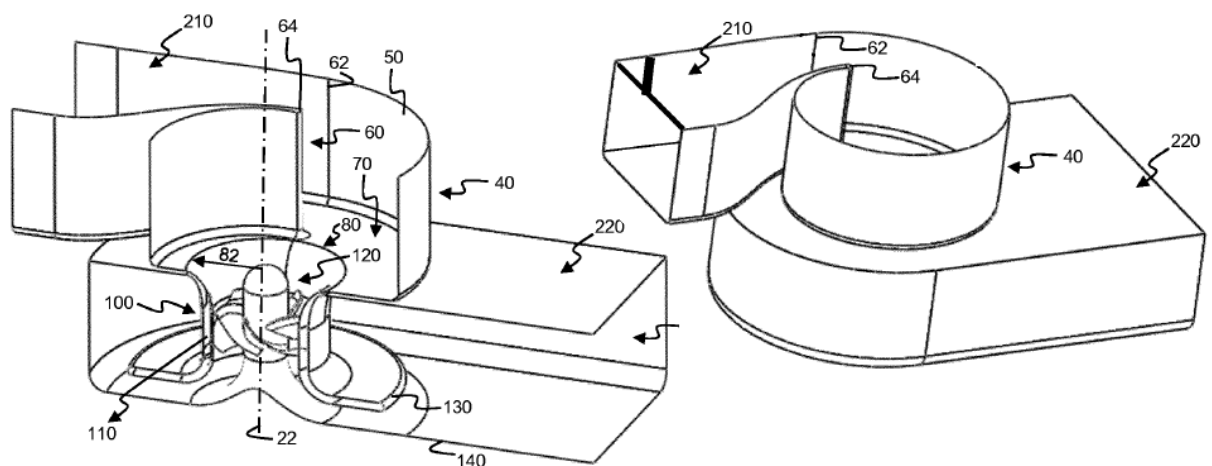


Figura 15 *Turbulent Gravitational Vortex Water Turbine* G. Slachmuylders  
Fuente: World Intellectual Property Organization (2015)

La tecnología desarrollada por “Turbulent” tiene su mayor enfoque en la turbina, una hélice como las de las turbinas tipo Kaplan, con alabes diseñados especialmente para transformar de manera eficiente la energía hidráulica del vórtice en energía mecánica, para su fácil instalación, crearon como se observa en la figura 16, un equipo de una sola pieza que incluye los álabes, el rodete, la caja de cambios y el generador, de este modo, buscan facilitar la instalación y utilización de su tecnología.



*Figura 16 Equipo generador Turbulent  
Fuente: Turbulent (2018)*

En el ámbito nacional, tiene gran relevancia la empresa “Turbulent”, “Entró en funcionamiento la primera turbina de energía micro hidroeléctrica rentable en Chile” (AGRYD, 2018), luego de desarrollar su prototipo y conseguir su patente, como se observa en la tabla 3, el primer lugar donde instalan su tecnología, gracias a “Start up Chile” y “Corfo” es en Chile, para un agricultor ubicado en Doñihue, el proyecto, figura 17, funciona con  $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$  y una caída de  $1,7 \text{ m}$ , capaz de generar  $15 \text{ kW}$  de potencia las 24 horas del día el 90% del año, y gracias a que requiere poca mantención, puede generar hasta  $105 \text{ MWh}$  durante el año, el equivalente al consumo de 30 a 40 casa chilenas, como se menciona en la revista (AGRYD, 2018) . Este proyecto ER, tiene un retorno de inversión de 5 años con un costo de generación de  $20 \text{ CLP/kWh}$ . En la tabla 3 se indican plantas generadoras en base a la tecnología TVG.

La central instalada en Doñihue permitió la entrada de la empresa a Chile y dio confianza en el uso de su tecnología, de este modo al año siguiente a la instalación en Doñihue, se instala una segunda central en Cunco, región de la Araucanía, actualmente está en desarrollo un proyecto para la instalación de una turbina en la Patagonia chilena.

*Tabla 3 Catastros centrales TVG de la compañía Turbulent*

	Lugar	Año	Estado	Potencia [kW]
1	Cleerbeek, Bélgica	2016	Finalizada	2,2
2	Doñihue, Chile	2018	Finalizada	15,0
3	Molino, EE. UU.	2018	Finalizada	15,0
4	Cunco, Chile	2019	Finalizada	5,0
5	Bali, Indonesia	2019	Finalizada	15,0
6	Versalles, Francia	2020	Finalizada	5,0
7	Otepää, Estonia	2020	Finalizada	5,5
8	Mindanao, Filipinas	2020	Desarrollo	150,0
9	Yilan, Taiwan	2020	Desarrollo	600,0
10	Idaho, EE. UU.	2021	Desarrollo	30,0
11	Vale das lobas, Portugal	2021	Desarrollo	15,0
12	Denver, UK	2021	Desarrollo	5,0
13	Patagonia, Chile	2022	Desarrollo	15,0

*Fuente: Elaboración propia en base a información de Turbulet (2021)*



*Figura 17 Turbina de Vórtice Gravitacional, micro hidroeléctrica potencia de 15kW, Doñihue Chile  
Fuente: AGRYD (2018)*

## **CAPITULO 3: EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN PROYECTO CON TURBINA DE VÓRTICE**

El objetivo general del trabajo es realizar una evaluación técnica, económica y ambiental para la aplicación de la “Turbina de Vórtice en canales de riego”. Para ello, se ha considerado una locación real en la región de O’Higgins, donde el alcance de este proyecto está limitado a la municipalidad de Palmilla, enfocado al estudio de canales en la zona buscando potenciales puntos de instalación para una TVG, de este modo se podrá realizar la evaluación técnica de condiciones reales para analizar las condiciones de operación más relevantes de dicha instalación, como variables geográficas, recurso hídrico, potencia instalada, factor de planta, equipamiento necesario, entre otros.

### **3.1 Localización del proyecto**

El proyecto se ubica en la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins en la pequeña ciudad de Palmilla un sector residencial urbano, con una población de 12.482 habitantes (Censo 2017). La mayor actividad económica proviene del cultivo de frutas, legumbres y hortalizas, además del cultivo de uva para producción de vino, donde es necesario contar con un derecho de uso de agua del tipo consultivo. Palmilla se encuentra ubicada a las cercanías del río Tinguiririca y del estero Chimbarongo, como se observa en la figura 18, el río abastece el canal de Palmilla el cual es administrado por una asociación de canalistas denominada “Comunidad de Aguas Canal Palmilla”, ellos cuentan con el derecho consuntivo del recurso hídrico. El canal Huicano es administrada por la “Asociación de canalistas canal Huicano” (Anexo 3).



*Figura 18 Vista aérea de la localización Palmilla  
Fuente: Google Maps(2021)*

Considerando los canales de mayor proximidad a Palmilla, se exponen los siguientes datos correspondiente a las alternativas del proyecto.

Canal Palmilla: una bocatoma ubicada a 5 km aproximadamente río arriba se encarga de abastecer el canal de Palmilla, según la DGA, ésta se encuentra en funcionamiento desde 1999, capta parte del río de manera gravitacional. La asociación cuenta con un derecho temporal de extracción de 300 acciones, un caudal de extracción efectivo de 885 lt/s (Ayala, Mayo 2000, págs. 158-170). El canal de Palmilla es rectangular no revestido de 5 m de alto por 4 m de ancho, largo de 6 km, y con una inclinación promedio de 1°, ya en Palmilla el canal se ramifica para ser distribuido a todos los miembros de la asociación.

Canal Huicano; su bocatoma se encuentra a 2 km del centro de Palmilla, capta su caudal del río Tinguiririca de manera gravitacional, con un derecho permanente de 300 acciones, un caudal mínimo de 885 lt/s y un máximo de 2.000 lt/s, la bocatoma es una estructura de concreto con compuertas metálicas, posteriormente, el canal es rectangular no revestido, 8 m de alto por 7 m de

ancho, tiene una longitud aproximada de 10 km con una inclinación promedio de 1,5°.

Para una apropiada evaluación de proyecto hidroeléctrico es necesario tener conocimiento del comportamiento del caudal de agua de la zona o región a estudiar, esta es una estimación del caudal para los años siguiente, analizando los registros de precipitaciones y caudales de años anteriores. La DGA, tiene una rama encargada de realizar un “pronóstico de caudales de deshielo para la temporada de riego” (División de Hidrología , 2021). El informe emitido por la DGA realiza una estimación en base al promedio histórico de 1991-2020, de éste se puede destacar que para el año 2022 se espera un 60% de precipitaciones durante el año en la región de O’Higgins, una estimación de 349 mm para el sector cordillerano de San Fernando, nacimiento del rio Tinguiririca, con una concentración de las precipitaciones en Mayo-Junio-Julio, lo que significará una acumulación de nieve. El caudal esperado para el año 2022 del rio Tinguiririca se puede observar en la figura 19.

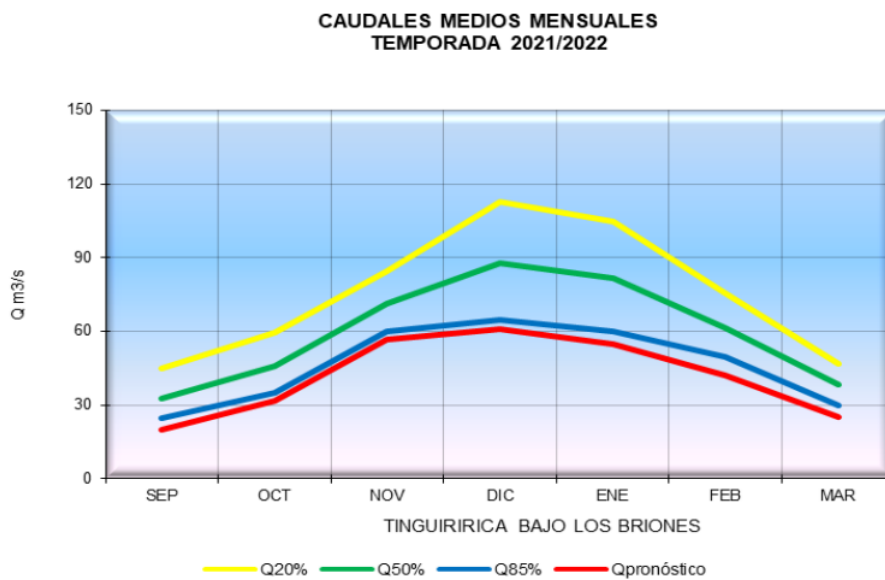


Figura 19 Curva estimada de caudal medio para el año 2022  
Fuente: DGA, división de Hidrología (2021)

### 3.2 Definiciones técnicas del proyecto

Para efectos de este estudio, la turbina que se propone es de la marca “Turbulent”, es una empresa belga que en el último tiempo se ha especializado en perfeccionar la turbina de vórtice gravitacional, a través de distintos modelos que se logren ajustar a distintos caudales. En la figura 20 se presentan las características nominales de los distintos modelos comerciales. Mayor detalle de la información entregado por el fabricante de sus productos se encuentran en el Anexo 4.

Representative Models	5 kW	15 kW	30 kW	50 kW	70 kW	Unit
Turbine hydraulic output	5.8	17.4	34.9	56.8	79.5	kW
Electrical output	5	15	30	50	70	kW
Maximal Energy generation per year	40,000	120,000	240,000	400,000	560,000	kWh
Nominal flow	0.7	1.5	2.2	3.1	3.8	m <sup>3</sup> /s
Nominal head	1.6	2	2.8	3.25	3.7	m
Impeller Diameter	800	1140	1200	1300	1500	mm
Rotor Height	385	550	580	625	730	mm
Vortex turbine core weight	135	275	300	360	475	kg
Generator and gearbox weight	180	350	600	950	1200	kg
Electrical cabinet. weight	220	270	330	390	480	kg

*Figura 20 Modelos comerciales de Turbulent.  
Fuente: Turbulent (2018)*

Esta tecnología de la empresa “Turbulent” es comercializada en modelos, clasificados por su producción nominal de 5 kW, 15 kW, 30 kW, 50 kW y 70 kW de potencia eléctrica, para un rango de caudal admisible de 0,5 m<sup>3</sup>/s hasta 4 m<sup>3</sup>/s. Conociendo los parámetros de producción de la tecnología, adicionalmente a la información expuesta en el punto 3.1, se puede seleccionar el modelo que se ajuste mejor para el proyecto.

Considerando que los canales disponibles son el Huicano y el Palmilla, se selecciona el canal Huicano, debido a que tiene un derecho de extracción permanente mínimo de 0,885 m<sup>3</sup>/s. La variación de caudal desde el río Tinguiririca, puede aumentar el caudal, pero no disminuirlo. Aunque el canal tenga una altura o pendiente insuficiente para el salto deseado, las dimensiones del canal, una altura de 7 m, permitirían construir una estructura con la altura de 1,6 m, altura nominal mínima de instalación (altura utilizada como base para el análisis del proyecto)

Considerando las condiciones específicas del canal Huicano y en base a la tabla de la figura 20, se determina que el modelo óptimo para el proyecto es el **modelo Turbulent de 5 kW**. Según las especificaciones proporcionadas por el fabricante, este modelo requiere un salto bruto nominal de 1,6 m y un flujo nominal de 0,7 m<sup>3</sup>/s. De acuerdo con Turbulent, este modelo podría generar hasta 40.000 kWh al año, con un factor de planta de 91%, equivalente al consumo de 10 a 15 hogares.

La elección de la turbina se basa en el hecho de que con el caudal de 0.885 m<sup>3</sup>/s, no se alcanza el mínimo necesario para la turbina de 15 kW. Por lo tanto, se opta por la turbina de 5 kW, sin embargo, si se utiliza todo el caudal disponible, no se aumentaría necesariamente el rendimiento, ya que los valores nominales que indica el fabricante es donde se consigue su máximo rendimiento, es por ello, que se le asigna un caudal nominal de funcionamiento al proyecto de 0,7 m<sup>3</sup>/s.

### 3.3 Especificaciones del equipo

A continuación, se presentan todas las especificaciones técnicas del equipo que están presentes en la turbina belga de la empresa Turbulent (Verreydt & Slachmuylders, 2015), está diseñada para tener el menor impacto en la vida acuática y promover la producción de electricidad descentralizada, entregando un producto que facilite la instalación de la tecnología. La empresa se encarga de producir y despachar el equipo generador y los accesorios auxiliares como el panel de control eléctrico, el cual entrega la electricidad en la magnitud deseada para su uso. La empresa entrega el siguiente producto, como se observa en la figura 21:

- *ROTOR CON ASPAS ESPECIALIZADAS PARA UN FLUJO ÓPTIMO DEL VÓRTICE.*
- *EQUIPO COMPACTO DE BAJA EMISIÓN DE RUIDO, YA QUE ES SUMERGIDA.*
- *SISTEMA DE ENGRANAJES SELLADOS, PARA TODO TIPO DE INUNDACIONES.*
- *SISTEMA SECUNDARIO DE SELLADO, CON CAPAS MÚLTIPLES DE PROTECCIÓN CONTRA MATERIAL PARTICULADO U OBJETOS COMO RAMAS U OTROS.*
- *ROTOR Y SOPORTE FABRICADO EN ACERO INOXIDABLE, SIMILAR AL USADO EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA.*
- *LAS DEMÁS PIEZAS DE ACERO CUENTAN CON UN RECUBRIMIENTO DE ÓXIDO DE ZIRCONIO (ZRO<sub>2</sub>) RESISTENTE AL ROCE.*
- *ASISTENCIA PARA LA INSTALACIÓN DE SU EQUIPO.*
- *EQUIPO LIBRE DE MANTENIMIENTO DEL PROVEEDOR, SISTEMA DISEÑADO PARA QUE LA MANTENCIÓN SEA*

REALIZADA POR UN PROFESIONAL BAJO LA INDUCCIÓN DEL FABRICANTE.

- *DISPONIBILIDAD DE PRODUCCIÓN 90% DEL AÑO.*

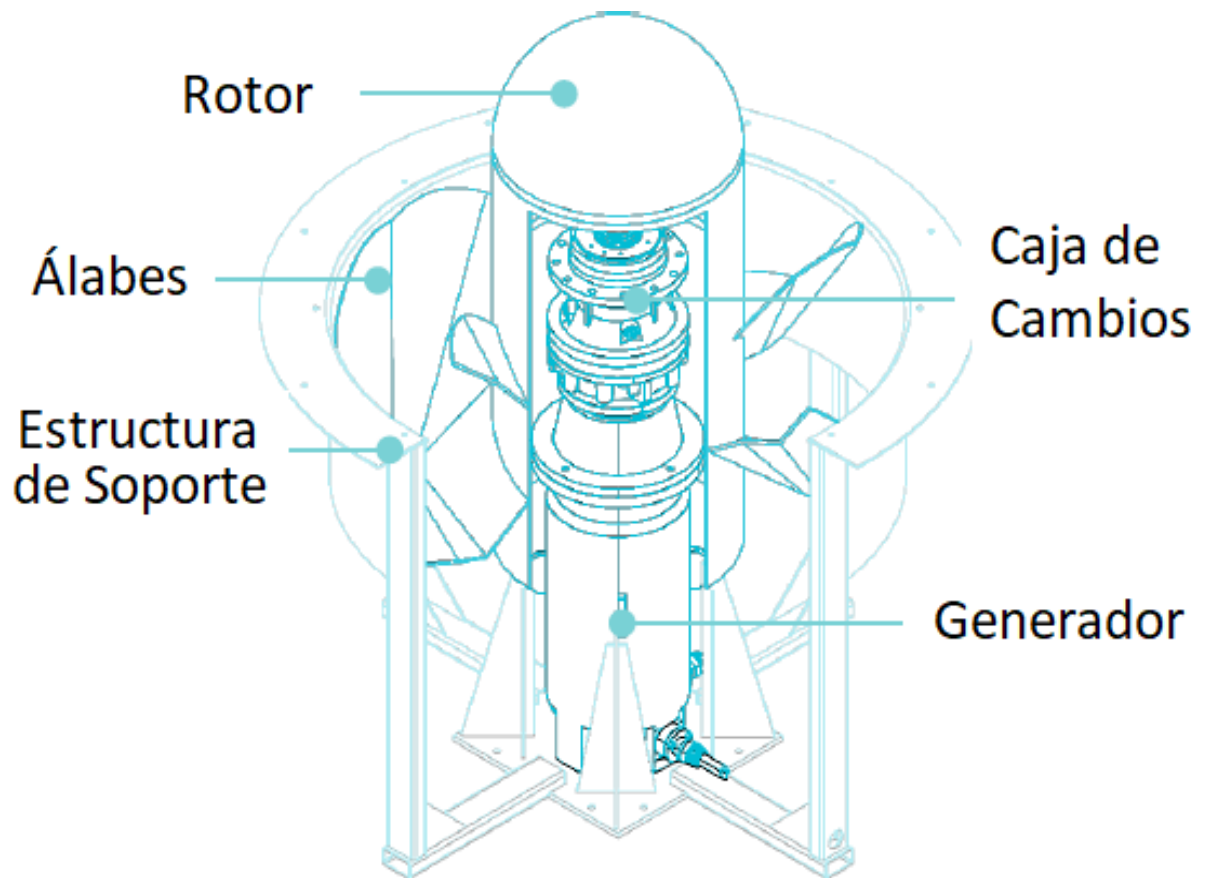


Figura 21 Tecnología turbina Turbulent  
Fuente: Turbulent (2018)

Las tablas que se presentan a continuación detallan minuciosamente las especificaciones técnicas de esta tecnología líder en su categoría. Desde sus dimensiones precisas hasta su funcionamiento interno y los protocolos de mantenimiento preventivo, esta información brindará una visión completa de lo que significa incorporar la tecnología Turbulent Modelo 5 kW en este proyecto.

Tabla 4 Especificaciones técnicas turbina Turbulent modelo 5kW

Modelo	5 kW
Salida de la turbina hidráulica	5,8 [kW]
Salida de electricidad	5 [kW]
Factor de planta	0,91 (*)
Máxima energía generada por año	40.000 [kWh]
Caudal nominal	0,7 [m <sup>3</sup> /s]
Altura nominal	1,6 [m]
Diámetro rodete	800 [mm]
Altura del Rotor	385 [mm]
Peso equipo mecánico	315 [kg]
Peso equipo eléctrico	220 [kg]
Vida útil	25 años

(\*) Factor de Planta = generación real / generación teórica

Fuente: Turbulent (2018)

Tabla 5 Detalle de mantenimiento Turbina Turbulent

Ítem	Intervalo de mantenimiento
Cambio de aceite caja de cambio	Cada 6 meses
Reajuste de los tornillos	Una vez al año
Inspección visual general	Una vez al año
Reemplazo de los sellos	Cada 2 años
Engrasar los rodamientos de caja de cambio	Cada 2 años
Chequeo de los controles eléctricos	Cada 2 años
Reemplazo de los rodamientos	Cada 3 años

Fuente: Turbulent (2018)

### 3.4 Instalación del equipo

Una ventaja considerable de este equipo es su facilidad de transporte, el equipo puede ser transportado en un camión 3/4, tanto el equipo mecánico como eléctrico pueden ser transportados en un contenedor marítimo Dry-van estándar de 20 pie<sup>3</sup>, el más pequeño del mercado, TU-20.

Las obras necesarias para la instalación del equipo son relativamente simples, el canal de Huicano transcurre por zonas rurales cercanas a zonas urbanas, por lo que sería de fácil acceso, la construcción de la central puede ser elaborada por mano de obra local, sin necesidad del uso de gran maquinaria como se muestra en la figura 22. Para facilitar la construcción e instalación el canal Huicano puede ser cerrado gracia a la bocatoma en el río Tinguiririca, como muestra la figura 23.



*Figura 22 Construcción del caracol  
Fuente: Turbulent (2018)*



Figura 23 Bocatoma El Huicano  
Fuente: DGA (1999)

Se estima una mano de obra necesaria para la construcción de la central y su posterior operación y mantenimiento de 12 personas, como se indica en la tabla 6.

Tabla 6 Personal en fases de la central

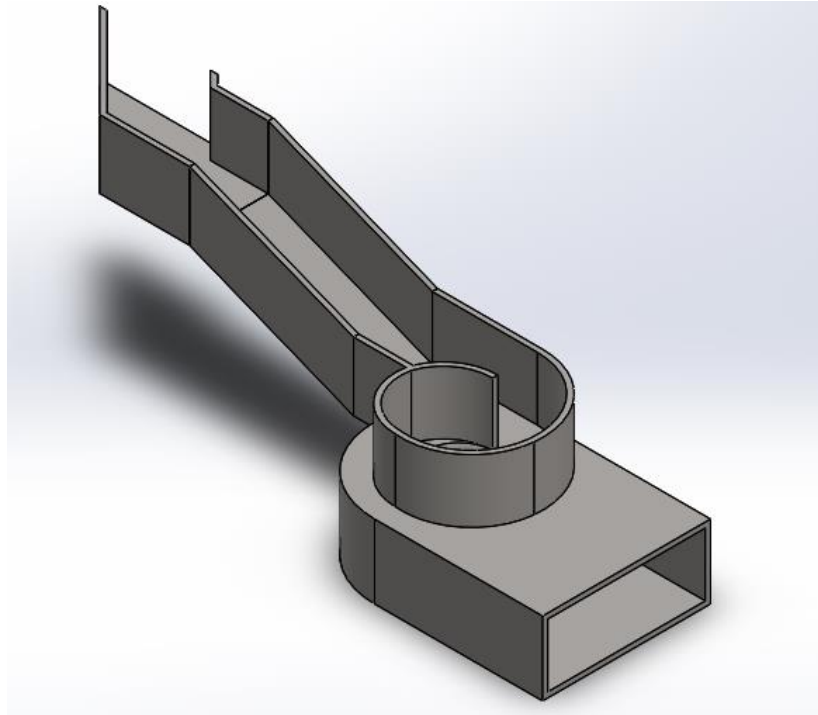
Fase	Construcción	Operación
Trabajadores	8	4
Responsabilidades	Transporte de los materiales de construcción, equipo mecánico y eléctrico. Construcción obra civil, revestimiento del canal e instalación del equipo	Operación y mantenimiento especificado por el proveedor. Seguimiento y evaluación constante de su funcionamiento y producción.
Requisitos	Constructor con experiencia en revestimiento de canales.	Ingeniero mecánico. Ingeniero electrónico. O carrera afin.

Fuente: Elaboración propia en base a AGRYD (2018)

## **CAPITULO 4: MODELO DEL PROYECTO TURBINA DE VÓRTICE**

En este capítulo, se expondrá el diseño de la central en base a la información recopilada y determinada en los capítulos anteriores. A través de la herramienta CAD, SolidWorks, se modela la estructura de concreto, observada en la figura 24, La estructura de concreto está diseñada para cumplir varias funciones esenciales: captar el agua del canal, dirigir el flujo de manera eficiente y proporcionar un soporte robusto para la instalación de la turbina de vórtice gravitacional modelo de 5 kW. En el Anexo 5 se encontrará el modelo con las cotas asociadas al tamaño del modelo de 5 KW.

La empresa Turbulent se encarga de transportar la tecnología al sitio del proyecto y dirigir la instalación de ésta, es responsabilidad del titular del proyecto hacer las gestiones para contratar una empresa local de ingeniería en construcción para elaborar la obra civil del proyecto hidroeléctrico. En el caso de este proyecto, que se plantea anteriormente en el numeral 3.1 en el canal Huicano, el titular del proyecto correspondería a la “Asociación de Canalistas canal Huicano”.

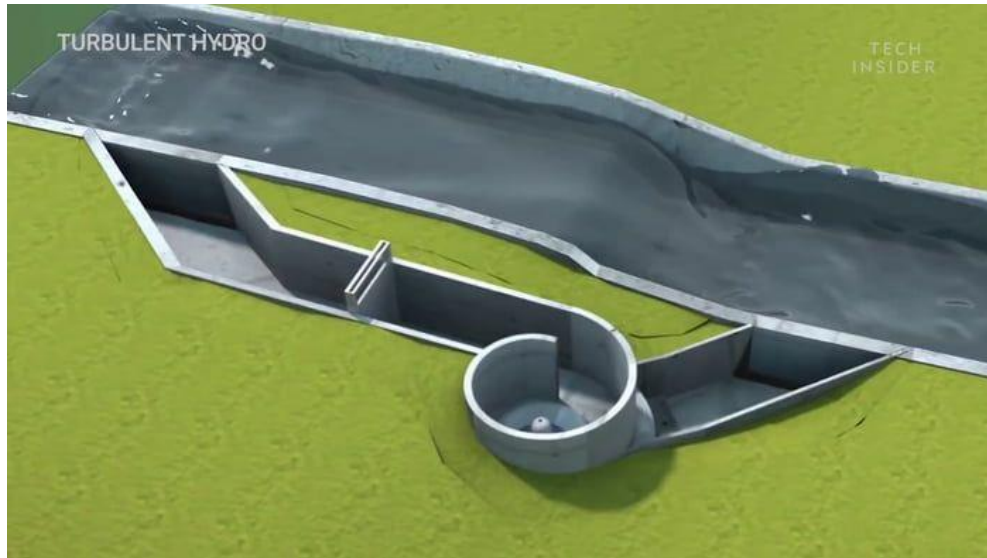


*Figura 24 Modelo de la Micro Central Hidráulica de pasada con tecnología Turbulent  
Fuente: Elaboración propia en base a "Turbulent"*

Como se mencionó anteriormente, la TVG es una tecnología para desarrollar centrales hidroeléctricas capaces de adaptarse a las distintas condiciones de la fuente hídrica, ya sea tener el caudal mínimo suficiente, o una baja altura bruta. Como fue expuesto en el capítulo 2 de estado del arte, Turbulent y Zotlöterer han desarrollado distintas alternativas en la construcción de la obra civil para aprovechar el flujo de agua, sin la necesidad de realizar grandes alteraciones a la circulación de agua en el canal, las distintas obras civiles para captar y distribuir el agua se muestran a continuación:

A) Bypass del canal: Diseñado para ser la manera idónea de ser utilizada la central de vórtice. En un río o canal, de un caudal considerablemente mayor al caudal nominal que debe ingresar en la turbina, se instala una bocatoma como se muestra en la figura 25, la cual captará una cantidad de agua del canal dependiendo del caudal, este será dirigido al caracol y por medio de una

compuerta será controlado el caudal que ingresa a la turbina, para posteriormente ser devuelto al cauce original.



*Figura 25 Obra civil de Bypass  
Fuente: Trubulent (2018)*

B) Rebalse del canal: En condiciones donde el caudal del canal o río, sean cercanas al caudal nominal de la turbina, se puede construir una obra civil, con un mayor grado de intervención al flujo normal del agua, en este caso se capta la totalidad del agua que fluye a través de éste, pero antes de llegar a la turbina, una sección del muro es de menor altura, permitiendo el rebalse del agua al canal, para así asegurar la entrada necesaria a la turbina, como se muestra en la figura 26.



*Figura 26 Obra civil de rebalse  
Fuente: Zotloterer (2004)*

#### **4.1 Obra civil proyecto turbina de vórtice gravitacional**

El material recomendado por la empresa Turbulent para realizar la estructura indicada en la figura 24 es de hormigón armado, además, como indica (Díaz, 2008), en su estudio “Características de muros de hormigón armado” lo define como un “muro diseñado para resistir combinaciones de esfuerzos axiales, cortante y de momento torsor, producidos por los movimientos sísmicos” (Díaz, 2008) Indica que el muro requiere una malla horizontal doble, como se muestra en la figura 27, con una separación de 15 a 20 cm, los bordes donde inicia el hormigón deben tener elementos especiales de refuerzo, como cadenas o trabas, de este modo se puede confinar para evitar fisuras en sus puntos más expuestos, además de barras de acero estriadas para los bordes inferiores y superiores.

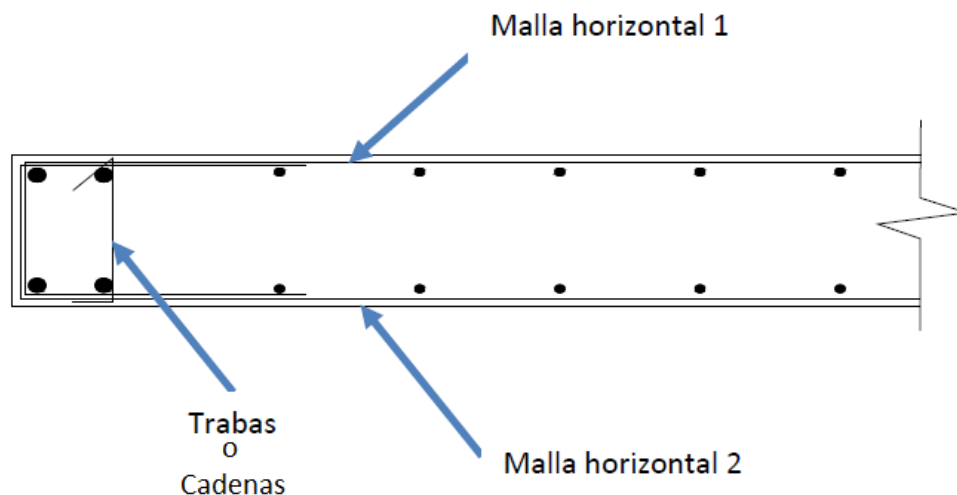


Figura 27 Confinamiento de armadura vista superior  
Fuente: Gustavo Díaz (2008)

En respaldo a la información expuesta el libro “Hidráulica aplicada al diseño de obras” (Mery, Hidráulica aplicada al diseño de obras, 2013), indica en su texto, las ventajas del hormigón es que es un material de costo reducido, fácil colocación y reparación, es un material frecuentemente ocupado en canales y centrales hidráulicas, evita el crecimiento de vegetación, mejora las características del flujo, bajo costos de mantención. Como desventaja el hormigón es susceptible a fisuras por los cambios de temperatura en el ambiente y una baja resistencia al desgaste, sin embargo, para caudales cuyas velocidades son menores a los 2,5 m/s, tiene una prolongada resistencia a la erosión, considerando el modelo mostrado al inicio del capítulo, con un ancho de 1,12 m y una altura de 0,96 m (medidas indicadas en Anexo 5) se determina un área de sección transversal del distribuidor de 1,075 m<sup>2</sup> y un caudal, indicado en el numeral 3.1, de 0,885 m<sup>3</sup>/s, la velocidad del agua sería de 0,82 m/s, el suelo de la fundación para la sección revestida debe soportar los revestimientos laterales. El hormigón terminado con una llana (herramienta para el acabado superficial del concreto, para alisar y suavizar) tiene un coeficiente de rugosidad

de Manning de  $n=0,012$ , el cual es un indicador de las pérdidas de energía de altura para la generación de P.E.

La obra civil consistirá en utilizar de maquinaria pesada y mano de obra local en el siguiente proceso:

A. Instalación de Faena

Fase de preparación y planeación para ejecutar el proyecto, se transportan los materiales y la maquinaria necesaria para realizar la obra civil a la ubicación de la instalación en el canal.

B. Previo al hormigón

Se debe excavar la zona a utilizar paralela al canal, el fondo debe ser aplanado, luego con un encofrado, que es un sistema de paneles fijados con alineadores y pernos que fijan los paneles contrapuestos para soportar el peso del hormigón mezclado en estado líquido, dentro del molde deberá estar la estructura de acero que se mencionó anteriormente, como se muestra en la figura 28.



*Figura 28 Molde de encofrado para el hormigón  
Fuente: ulmaconstruction.cl*



Figura 29 Revestimiento estructura de caracol  
Fuente: Turbulent (2018)

### C. Vertido del hormigón armado

Un camión de cemento mezclado descargará su contenido en el molde encofrado, con la estructura de acero, la mano de obra estará situado en el vertido, los operarios se encargarán de que el concreto sea bien esparcido en el fondo del canal, para su posterior secado y curado, la capa será hecha a mano para mejor terminación, como se observa en la figura 29.

### **4.2 Instalación y puesta en servicio**

Para la instalación se requiere transportar el equipo generador a la ubicación definitiva, esto considera la importación de la tecnología extranjera por la aduana y el transporte desde el puerto de entrega a la locación indicada, como se mencionó anteriormente, el equipo cabe fácilmente en un camión  $\frac{3}{4}$ , sin embargo, es necesario una grúa para realizar la instalación de la turbina al caracol, ya que tiene un peso de 315 kg, indicado en el numeral 3.3, como se muestra en la figura 30.



*Figura 30 Instalación de la TVG  
Fuente: Turbulent (2018)*

Una vez instalada la turbina, la central se encontrará finalizada, pero no en funcionamiento, como se mencionó en el capítulo 3, los estudios previos para determinar los parámetros de la MCHP son bajo la teoría de las máquinas hidráulicas. Antes de poder entregar la potencia generada a la red o sistema seleccionado, se debe realizar una serie de pruebas, en donde se observará y determinará el real desempeño y generación de la central, se corregirán imperfección o errores en su funcionamiento para optimizar la generación de electricidad.

## **CAPITULO 5: EVALUACIÓN ECÓNOMICA DE UN PROYECTO CON TURBINA DE VÓRTICE**

Ya sea en energías renovables como convencionales, los aspectos económicos de un proyecto eléctrico presentan una gran relevancia para promover la instalación de una central hidráulica de pasada, utilizando la tecnología *Turbulent*. Las ventajas ambientales, tienen un valor legal y político para la autorización del proyecto, pero no un criterio significativo al momento de promover la tecnología a los dueños de canales en Chile. Esto debido a que el factor de interés para el público objetivo es “¿cómo puedo utilizar un recurso con el que ya cuento para abaratar mis costos de operación o inclusive generar un segundo ingreso de sus operaciones?”.

Anteriormente, se estudió la factibilidad técnica de la turbina, analizando si la instalación de la turbina de vórtice es factible y si ésta puede producir energía de manera eficiente. En el siguiente capítulo se evaluará la viabilidad económica del proyecto, si es conveniente para los dueños de los canales invertir en una MCHP utilizando la tecnología *Turbulent* de TVG. Dependerá de los indicadores económicos determinados, por la evaluación económica del proyecto, el monto de inversión inicial, la propuesta de valor y el retorno de la inversión.

## **5.1 Costos asociados**

De acuerdo con el “Informe de costos de tecnologías de generación” (Ministerio de Energía GOB, Marzo 2020) el cual indica de manera sistemática los costos de las distintas energías de generación que existen en Chile, tanto convencionales como no convencionales, entrega una lista de conceptos y equipos que requieren ser considerados para la instalación de una central eléctrica. En relación con la tecnología seleccionada para este trabajo, la clasificación que se asemeja más al informe antes indicado es la generación de Mini-Hidráulica, denominación para todas aquellas centrales generadoras de energía en base hidráulica con una generación menor a 20 MW de potencia eléctrica.

De acuerdo con la información expuesta en la figura 31, que indica los costos de proyectos de centrales hidráulicas en los últimos años, utilizando cada valor en cada proyecto hidráulico constituido, considerando el promedio de los costos unitarios obtenidos a partir de la información proporcionada por el profesor W. Jara, (profesor del Magister en Economía Energética de la UTFSM). El promedio de “inversión específica (MM US\$/MW)” es de 2,1191MM US\$/MW, reduciendo la escala a KW se define un valor de 2.119 US\$/kW como costo de inversión unitario referencial, es decir, para este proyecto con una potencia nominal de 5 KW, la inversión correspondería aproximadamente US\$10.595.

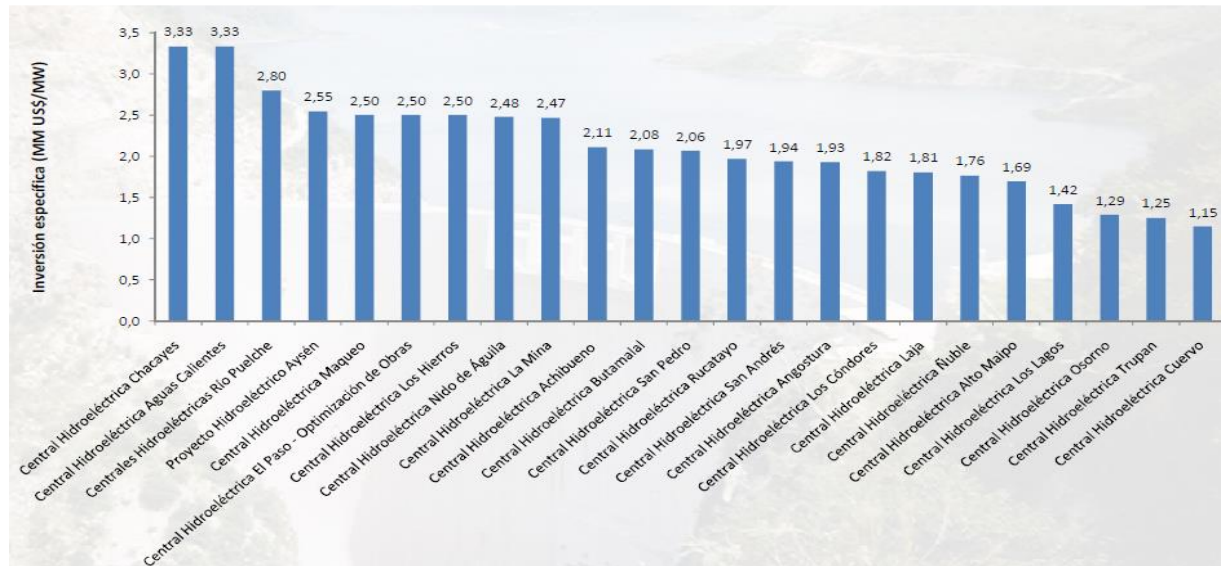


Figura 31 Costos de una central hidráulica  
Fuente: IGNEO Consultores, Proyectos Energéticos - W. Jara MEE-UTFSM (2023)

A continuación, se indican, de manera resumida, todos los elementos de gastos, que corresponden a la instalación de la TVG, es decir, todo lo necesario para comprar la turbina, cualquier otro equipo relacionado que sea necesario para la instalación, mano de obra, alquiler de equipos, materiales, etc.

En los costos relacionados con las centrales hidráulicas, las **obras civiles** siempre adquieren una importancia fundamental. Esto se debe a que, en promedio, el 60-70% de los costos totales están directamente relacionados con las obras civiles. Esto se debe principalmente a la necesidad de construir una infraestructura significativa para controlar y dirigir el flujo de agua, como represas u otras estructuras similares.

El **equipamiento mecánico** (turbinas, válvulas, compuertas) comprende todos los componentes tecnológicos encargados de transformar la energía hidráulica en energía mecánica. Además, incluye otras obras hidráulicas que brindan soporte para el manejo adecuado del recurso hídrico y el funcionamiento eficiente de la turbina, como bocatomas, compuertas, por mencionar algunos.

El **equipamiento eléctrico** (generador, transformador, medición y protección) engloba todos los elementos involucrados en la generación de electricidad. Para garantizar un suministro eléctrico estable y seguro, también es necesario contar con un sistema de soporte que permita medir, controlar, transformar y distribuir la energía eléctrica producida. Esto es especialmente crítico en la generación hidroeléctrica, ya que la potencia generada puede variar debido a las fluctuaciones en el caudal, lo que puede ocasionar cambios en la tensión.

Además de estos costos técnicos, es importante tener en cuenta los **gastos de gestión** (ingeniería, EIA, permisos) en un proyecto de ER. Estos gastos están relacionados con la administración, supervisión y coordinación integral del proyecto en todas sus etapas, desde la planificación inicial hasta la operación y el mantenimiento continuos. Estos costos son esenciales para garantizar que el proyecto se desarrolle de manera eficiente y cumpla con todas las regulaciones y estándares aplicables.

## **5.2 Gastos de operaciones**

Otro aspecto clave a considerar en los costos asociados a la instalación de la central, es la estimación de los gastos operativos y de mantenimiento que se esperan durante la vida útil de la turbina de vórtice gravitacional. Esto abarca una serie de elementos, como mantenimiento regular, reemplazo de piezas y lubricación, entre otros.

De acuerdo con los hallazgos presentados en el informe de inversiones en energías del Ministerio de Energía del Gobierno (Marzo de 2020), en relación a nuestro tema de interés, los gastos operativos engloban todos los consumibles, paradas no planificadas y trabajos necesarios para garantizar el funcionamiento óptimo y constante de la turbina. A diferencia de otras tecnologías de generación, como una termoeléctrica que requiere combustible por dar un ejemplo, esta

central no requiere insumos adicionales aparte del flujo de agua para operar. Por lo tanto, sus costos operativos tienden a ser relativamente bajos en comparación con otras tecnologías. En promedio, los costos de mantenimiento representan alrededor del 1% de la inversión total

### **5.3 Mercados identificados**

Una vez especificado e indicado los conceptos involucrados para el costo de capital y los egresos presentes durante la vida útil de la central, la siguiente parte de la evaluación económica, es determinar los ingresos que pueden generar el proyecto, para ellos primero se debe estimar cuanta energía se producirá con la turbina de vórtice, datos que fueron explicados y determinados en los capítulos 3 y 4 del trabajo. Segundo, se debe estimar cuanta ganancia se podría generar con la venta de esta energía o cuanto compensaría en los propios gastos de electricidad, es decir, cuanto se ahorraría en los costos de operación al utilizar la energía que se genera para alimentar los propios equipos o instalaciones, en ese caso se debe estimar cuanto se gasta actualmente para determinar el ahorro y así la ganancia.

En Chile existen varios negocios identificados para la venta de energía eléctrica, de acuerdo con lo indicado por el profesor de Magister en Economía Energética Pedro Gatica (UTFSM) los posibles negocios para energías renovables no convencionales son:

- I. NEGOCIO DE GENERACIÓN
- II. BONOS DE CARBONO
- III. APORTE A LEY ERNC

Antes de determinar los posibles ingresos, es necesario aclarar cómo funciona el mercado eléctrico en Chile, el cual se separa en tres secciones, la generación, la transmisión y la distribución, como se observa en la figura 32. De acuerdo con la (Comisión Nacional de Energía y Deutsche Gesellschaft für

Technische Zusammenarbeit, Marzo 2009) es explicado como las ER se involucran en el mercado eléctrico chileno, hace referencia a que tanto la transmisión como distribución son monopolios, administrados por un organismo gubernamental denominado CEN (Coordinador Eléctrico Nacional), mientras que el área de generación es un mercado competitivo, donde distintas empresas privadas pueden invertir con distintas tecnologías de generación.

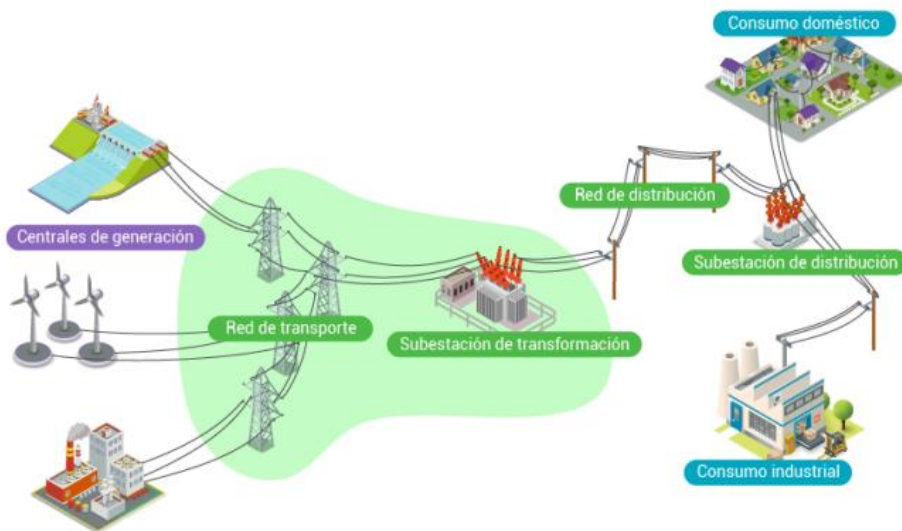


Figura 32 El mercado eléctrico en Chile  
Fuente: Curso Smart grid (2009)

El sistema de CMG es un método para que, en teoría, los ingresos generados por la venta de energía, el consumo de potencia en los clientes domésticos y la potencia consumida en los clientes industrial sean capaces de cubrir exactamente los costos de inversión y los costos operacionales de generación, como se muestra en la figura 33, así el mercado spot determina el precio de energía resultado del equilibrio instantáneo de oferta y demanda.

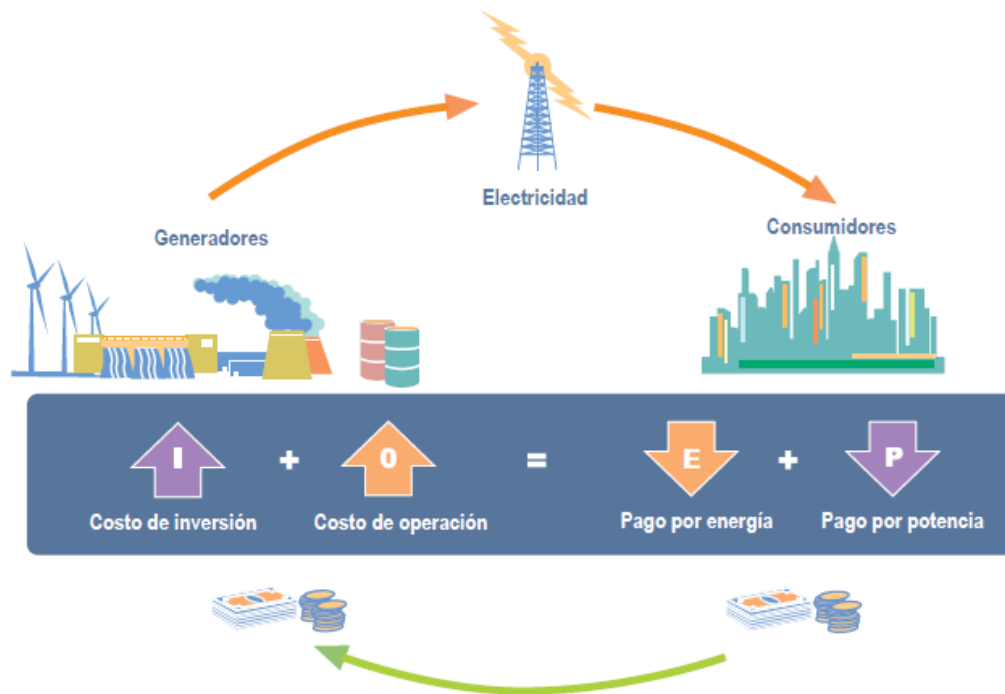


Figura 33 Teoría de equilibrio de costos marginales  
Fuente: Las ERNC en el mercado eléctrico chileno (2009)

### 5.3.1 Negocio de generación

El valor económico de la energía inyectada durante la vida útil del proyecto dependerá de los futuros precios del mercado spot y de la producción futura de la central.

El precio mercado spot corresponde al costo marginal instantáneo de energía, asociado a una unidad de energía suministrada. Se calcula para cada uno de los nodos del SEN y su valor se actualiza cada 1 hora, el CM se pondera por el tiempo. (Comisión Nacional de Energía y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Marzo 2009)

### **5.3.2 Bonos de carbono**

Desarrollado al interior del mecanismo de desarrollo limpio (MDL), permite obtener una remuneración por la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> atribuible al despacho de la ER.

El MDL es un sistema establecido por el acuerdo de Kyoto que involucra a los países asociados a la ONU, el cual permite que países desarrollados, pueden inscribir acuerdos de reducción de emisiones contaminantes, realizando un acuerdo con un país para que ellos reduzcan su huella de carbono y contabilizar las reducciones alcanzadas como parte de su propio compromiso para disminuir sus emisiones de carbono, es decir, un país desarrollado puede pagar una reducción de carbono en otro país, para que él no tenga que hacerlo.

Para que el proyecto pueda comercializar bonos de carbono, primero debe ser postulado y aprobado por la Oficina de Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC), en ese momento el proyecto puede comercializar las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas durante las operaciones. La cantidad de reducción emitida debe ser verificada y certificada anualmente por la UNFCCC, el proyecto puede ser certificado por periodos de hasta 7 años, y revalidados hasta dos periodos más.

Para efectos económicos, 1 bono de carbono equivale a 1 Tonelada de CO<sub>2</sub> o un equivalente de Gas de Efecto Invernadero (GEI), que ha sido removido gracias al proyecto, en el periodo de un año.

Actualmente este valor es despreciable, ya que de acuerdo con la IPCC (GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC), 2014) para países desarrollados, los proyectos que generar bonos de carbón suelen ser más costosos y están sujetos a estándares y requisitos rigurosos, por lo que no se considera en las evaluaciones económicas de proyectos ER.

### **5.3.3 Aporte Ley ERNC**

De acuerdo con la Ley 20.257 artículo 150°, toda empresa que efectúe retiros de cualquier sistema eléctrico para su comercialización, debe acreditar que una parte de sus retiros son con fuentes de energía renovables, esto significa que la ley crea un mercado de acreditación en torno a la generación de electricidad por medio de ER, es decir, un proyecto de esta categoría, como el estudiado en este informe, tiene la oportunidad de vender su producción al mercado spot y además, sus derechos de acreditación a otro generador, ya que, la ley indica que toda empresa que haya cumplido el porcentaje mínimo señalado, podrá traspasar sus excedentes a otra empresa, inclusive a diferentes sistemas eléctricos.

La Ley 20.257 “LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS RESPECTO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES” (2013) en su artículo 150° indica lo siguiente.

“La empresa eléctrica que no acredite el cumplimiento de la obligación a que se refiere este artículo al 1 de marzo siguiente al año calendario correspondiente, deberá pagar un cargo, cuyo monto será de 0,4 UTM por cada MW/hora de déficit respecto de su obligación. Si dentro de los tres años siguientes incurriese nuevamente en incumplimiento de su obligación, el cargo será de 0,6UTM por cada MW/hora de déficit”

La ley crea un mercado de acreditación que solo puede ser explotado por tecnologías ER y por lo visto en el resto del capítulo, un generador ER puede vender su producción al mercado spot y sus derechos de acreditación a otro generador con retiros para suministrar al cliente final, el precio obtenido de la acreditación será de un máximo del valor de la multa bajo el incumplimiento de esta norma, es decir de 0,4 UTM por cada MW/h es decir unos 31,21 USD/MWh.

Desde la aplicación de la ley, la generación eléctrica nacional ha llegado a ser un 41% del tipo ER, (CEN, 2024), eso significa que en el último periodo ha habido

una sobreoferta de proyectos, en especial del sector solar, como resultado se ha observado una competencia intensa para la venta de la acreditación ER, disminuyendo así el precio del valor por la venta de la acreditación de ER, es por ello que el valor es despreciable y no se considera en las evaluaciones económicas de proyectos ER.

#### **5.4 Ley Net Billing**

Como se ha visto en el apartado anterior, los datos proporcionados por el CNE sobre los mercados identificados se expresan en MWh. En el caso de nuestro proyecto, estamos hablando de una generación en kWh.

Sin embargo, aquí radica una oportunidad, el modelo Turbulent que hemos seleccionado es el más pequeño, lo que significa que, si las condiciones lo permiten, se podría expandir la capacidad de generación eléctrica hasta alcanzar varios MWh. Esto abriría las puertas al lucrativo "Negocio de Generación".

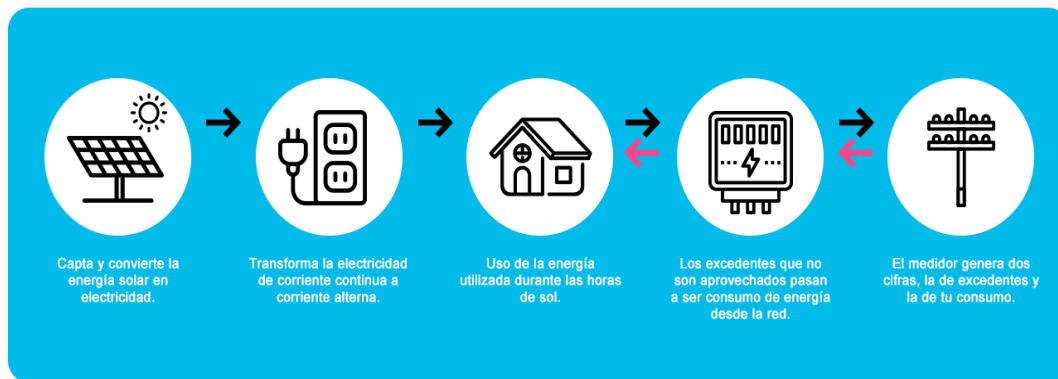
En Chile, se dispone de un sistema conocido como "Net Billing" o "Medición Neta", que brinda la posibilidad de inyectar el exceso de energía en la red eléctrica y recibir una compensación por ello.

El sistema de "NetBilling" está regulado por la Ley 21.118, que permite a los propios generadores de energía, vender su exceso de electricidad a la compañía eléctrica local. El precio al que se vende este exceso de electricidad es determinado por la Comisión Nacional de Energía (CNE).

De acuerdo al Ministerio de Energía, la Ley 21.118 para la generación distribuida tiene por objetivo "Dar derecho a los clientes regulados de las Empresas Distribuidoras a generar su propia energía eléctrica, mediante medios renovables no convencionales o de cogeneración eficiente, auto consumirla y vender sus excedentes de energía a la empresas distribuidoras (clientes regulados corresponden, en general, a pequeños y medianos consumidores que

tengan una capacidad conectada inferior a 2.000 kW), y donde el sistema de generación con energías renovables tenga una potencia instalada menor a 300 kW nominal.” (Energía, 2014)

La forma en que funciona de acuerdo con la Ley 21.118 (Ministerio de Energía, 2012) es bastante simple:



*Figura 34 Funcionamiento NetBilling  
Fuente: ENEL.cl (2023)*

En el Anexo 6 se entregan mayores detalles del funcionamiento de la Ley Net Billing.

De esta forma la Ley 21.118 de Net Billing desempeña un papel fundamental al fomentar la generación personal de energía. Esta ley otorga a los usuarios de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en sus propiedades, el derecho de generar su propia electricidad y, al mismo tiempo, conectarse de manera segura a la red eléctrica. Se han establecidos una serie de parámetros que garantizan una conexión segura y legal entre el usuario y el distribuidor de energía.

Si se aplica esta ley al proyecto de generación, se puede identificar diversas ventajas, incluso utilizando el modelo más grande de Turbulent, que alcanza los 70 kW, está por debajo del límite máximo permitido por la ley, que es de 300 kW. En contraste con las fuentes de energía solar, que generan

principalmente durante el día y carecen de producción durante la noche. El proyecto en estudio tiene la capacidad de generar energía de manera casi constante. Esto se traduce en un equilibrio mensual entre el consumo y la inyección de energía que tiende a generar excedentes a favor del titular. Estos excedentes no solo se traducen en descuentos en la factura eléctrica, sino también implican que la empresa distribuidora deberá remunerar por la inyección generada en la red a un precio acordado en los términos y condiciones del contrato entre el usuario y el distribuidor.

Como se mencionó anteriormente, hay que seguir una serie de gestiones para realizar una conexión del equipo de generación “residencial”, como lo define la CGE Distribución (Compañía General de Electricidad), empresa encargada de abastecer el sector de Palmilla de la Región de O’Higgins. Con el propósito de entrar al beneficio de Net Billing hay que realizar una serie de solicitudes legales y entrega de documentación a la CGE, para que ellos puedan aprobar y certificar la inyección de generación residencial a la red. En la figura 35 se puede observar los pasos a seguir para solicitar la conexión de equipamiento con sus respectivos precios, el costo total varía de 9,26 UF a 10,53 UF, el “Área típica” corresponde a la empresa distribuidora.

Actividades		Área Típica 2 (Ex CGE DISTRIBUCIÓN (Ex ELECDA) (Ex EMELAT)	Área Típica 3 (Ex ELIQUA) (Ex CONAFE)	Área Típica 4 (Ex EMELAR)
		Precio en UF C/IVA	Precio en UF C/IVA	Precio en UF C/IVA
1	Respuesta a Solicitud de Información Formulario 1.	1,08	1,08	1,09
2	Respuesta a Solicitud de Conexión Formulario 3 con presentación de Formulario 1 Previamente.			
2.1	Cuando el Equipo de Generación < capacidad Instalada Permitida.	0,09	0,09	0,09
2.2	Cuando el Equipo de Generación > capacidad Instalada Permitida.	1,21	1,25	1,15
3	Respuesta a Solicitud de Conexión Formulario 3 sin presentación de Formulario 1 Previamente.			
3.1	Cuando el Equipo de Generación > capacidad Instalada Permitida.	1,30	1,34	1,25
3.2	Monto a devolver en caso de que Equipo de Generación < Capacidad Instalada Permitida (en caso que exista pago previo)	1,11	1,15	1,06
4	Cambio de medidor a medidor bidireccional (no incluye equipo de medida). El precio asimilado al servicio regulado de esta actividad.			
4.1	Medidor Bidireccional Monofásico en B.T.	0,67	0,76	0,65
4.2	Medidor Bidireccional Trifásico en B.T. sin indicación de demanda.	1,21	1,63	1,63
4.3	Medidor Bidireccional Trifásico en B.T. con indicación de demanda.	1,36	1,89	2,05
4.4	Costos de reprogramación de medidor trifásico unidireccional a bidireccional (solo energía).	0,26	0,33	0,24
5	Supervisión puesta en servicio Equipo de Generación.	0,97	1,01	0,92

Figura 35 Tarifas para conexión de equipamiento de Generación Residencial  
Fuente: CGE (2023)

### 5.5 Parámetros de la evaluación económica

Como se ha observado en diversos informes relacionados con la energía hidráulica, y tal como se ha mencionado en este trabajo de título, los costos asociados a las turbinas hidráulicas, sin importar su tamaño o tipo (represa o de pasada), generalmente están dominados por la obra civil, que representa alrededor del 60% de la inversión total. Sin embargo, en este caso se evalúa la instalación de una microcentral hidráulica a una escala mucho menor, lo que conlleva costos de construcción específicos, y una distribución distinta de los gastos, como se detallan en la tabla a continuación.

De acuerdo con la información expuesta en el numeral 5.1, con una potencia teórica de 5 KW, la inversión de capital corresponde a \$10.595 USD, para la evaluación se asumirá una inversión global de \$10.500 USD.

*Tabla 7 Gasto de capital para la MCHP*

Proceso	Gasto capital	% CAPEX
Construcción	\$5.250 USD	50%
Instalación	\$4.200 USD	40%
Puesta en marcha	\$1.050USD	10%
<b>CAPITAL TOTAL</b>	<b>\$10.500 USD</b>	<b>100%</b>

*Fuente: Elaboración propia en base a Turbulent*

Los parámetros de la evaluación económica son expuestos de manera resumida en la tabla 8, el respaldo y justificación de los valores se presentan en el Anexo 7.

Tabla 8 Parámetros de la evaluación económica (valores supuestos)

Variable	Valor	Unidad	Detalle
Inversión	10.500	USD	Supuesto para evaluación
Potencia nominal	5	KW	Capacidad grupo turbina/generador "Turbulent"
Factor de Planta	0,91	--	Definido por fabricante (caudal y funcionamiento)
Generación Anual	40.000	KWh	GA=Potencia * 24h * 365d * FP
Tarifa de inyección	\$ 60	CLP/KW	50% de la tarifa mínima de cobro, máximo precio
Consumo Propio mes	400	KWh	Consumo eléctrico de operaciones agrícolas
Mantenimiento	105	USD	1% de inversión
Vida útil proyecto	25	Años	Especificación del fabricante.
Depreciación Tributaria	420	USD/año	Depreciación Normal
Impuestos	25	%	Impuesto de primera categoría a EBITDA
Derecho de agua	0	USD/año	Sociedad de regantes dueña del recurso
Tasa de descuento	10%	Anual	En base a proyectos similares

Fuente: Elaboración propia (2023)

## 5.6 Flujo de caja

La Tabla número 9 muestra el flujo de caja utilizando los parámetros detallados en el numeral 5.5. El horizonte de evaluación del proyecto se extiende por 25 años, y para evaluar los datos cruciales, se detallan los primeros 10 años. Es en esta tabla expandida donde se revela que el proyecto es viable económicamente, ya que su Valor Actual Neto (VAN) medido en MUS\$ (Mil US\$), es mayor al valor mínimo.

Tabla 9 Flujo de caja proyecto Turbina de Vórtice

Micro Hidraulica FP 91% 5 KW				Años										Años			
Negocio NetBilling y Ley ERNC				Unidad	-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	25
<b>Unidades Fisicas</b>																	
Consumo Propio	400 kw/mes	MW/h		4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Inyeccion		MW/h		35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2	35,2
<b>Precios</b>																	
Tarifa BT1	\$0,14 US/kw	US\$		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Tarifa Inyeccion	\$0,07 US/kw	US\$		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Ventas</b>				MUS\$	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Ahorro Consumo propio		MUS\$		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Inyeccion		MUS\$		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>Costos</b>				MUS\$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Mantenimiento	1% inversión	MUS\$		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Flujo NetBilling y ERNC (EBITDA)</b>				MUS\$	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
<b>Depreciacion tributaria</b>				MUS\$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>Impuestos</b>				25%	MUS\$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<b>Inversiones Cap de trabajo</b>				MUS\$	11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Variacion capital de trabajo		MUS\$		0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Inversion	10.500	MUS\$	11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
CAPEX		MUS\$	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
<b>Patente derecho agua</b>				MUS\$	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Flujo de caja activo total</b>				MUS\$	-11	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

VAN	4,29 MUS\$	Rentable
TIR	18,85%	Oportuno

Fuente: Elaboración propia en base a "Evaluación económica de una ERNC" Prof. Ing. Pedro Gatica (MEE/USM)

## **5.7 Análisis de sensibilidad**

En el siguiente numeral se evaluará como afecta la viabilidad del proyecto, si los parámetros indicados en el numeral 5.5, varían en distintos rangos y que podrían generar dichas variaciones en un proyecto de generación hidráulica.

A continuación, se entrega una recapitulación de los factores que tienen relevancia en la producción y venta de energía en base a la ER.

- CANAL HUICANO; CANAL PRIVADO ABASTECIDO POR EL RIO TINGUIRIRICA CON DERECHO PERMANENTE DE FLUJO CON UN MÍNIMO DE 0,885 M<sup>3</sup>/S.
- LA INVERSIÓN DE CAPITAL PARA EL PROYECTO DE \$10.500 USD
- EL ESTUDIO FLUVIOMÉTRICO DEL RIO TINGUIRIRICA DE 1990 HASTA LA ACTUALIDAD INDICA UN 60% DE PRECIPITACIÓN PARA LA REGIÓN DE O'HIGGINS
- POTENCIA ELÉCTRICA NOMINAL DEL GRUPO TURBINA-GENERADOR ES DE 5 KW
- FACTOR DE PLANTA DEL PROYECTO 91%
- EL COSTO DE LA TARIFA DE SERVICIO DEL DISTRIBUIDOR LOCAL BT1 1 KWH = \$122 CLP, TARIFA DE INYECCIÓN 1 KWH = \$60 CLP
- EL CONSUMO DE POTENCIA POR LAS OPERACIONES DE LA INDUSTRIA AGRICULTORA ES DE 400 KW POR MES.

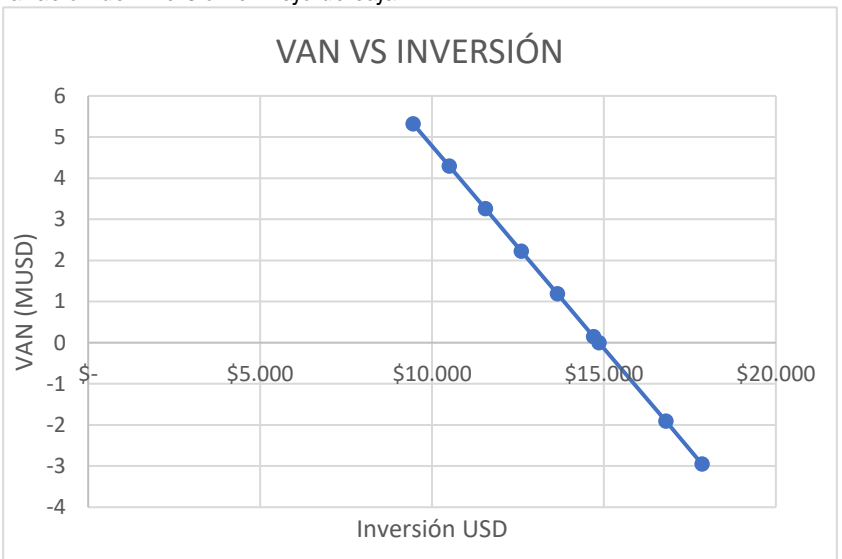
En los siguientes numerales, se varía uno de los factores mencionados anteriormente dejando el resto constante, para determinar su punto de equilibrio (VAN=0).

### 5.7.1 Inversión del proyecto

Es común que distintos factores externos puedan afectar el valor de la inversión, especialmente si la tecnología debe ser importada. En este análisis la pregunta que importa es ¿a partir de que valor de inversión el proyecto es viable?

Tabla 10 Variación de inversión en flujo de caja

Inversión (USD)	VAN(MUSD)
9.450	5,32
10.500	4,29
11.550	3,26
12.600	2,22
13.650	1,19
14.700	0,15
14.860	0
16.800	-1,91
17.850	-2,95



Fuente: Elaboración Propia

Punto de equilibrio para la inversión es de \$14.860 USD.

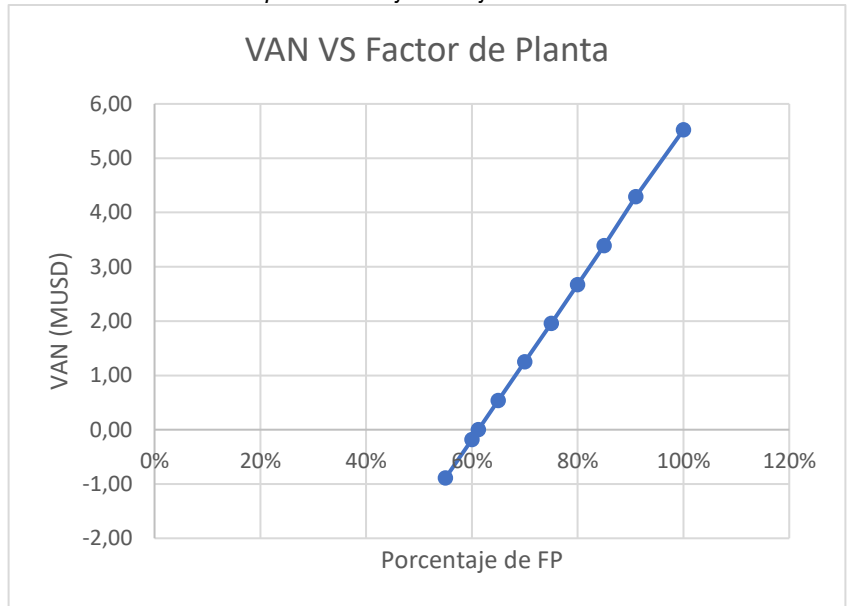
### 5.7.2 Factor de Planta

Como se especificó en el numeral 4.3, la energía generada por la turbina es determinada varios factores; por el caudal, la altura de instalación ( $H_b = \text{cte.}$ ), el tiempo de funcionamiento y la disponibilidad. El canal Huicano tiene un derecho mínimo de  $0,885 \text{ m}^3/\text{s}$  y un máximo de  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , pero, si existe sequía en la zona, inclusive con derecho, el caudal puede ser menor. Existen detenciones programadas y posibles problemas repentinos (fallas). Todos estos factores mencionados son involucrados en el "Factor de Planta". Entonces podemos utilizar el FP para evaluar cómo afecta la variación de generación en el

VAN. En este análisis la pregunta que importa es: ¿Cuál es Factor de planta para que el proyecto sea viable?

Tabla 11 Variación de Factor de planta en flujo de caja

FP (%)	VAN (MUSD)
100	5,52
91	4,29
85	3,39
80	2,67
75	1,96
70	1,25
65	0,54
61,25	0,00
60	-0,18
55	-0,89



Fuente: Elaboración Propia

Punto de equilibrio para factor de planta es de 61,25%.

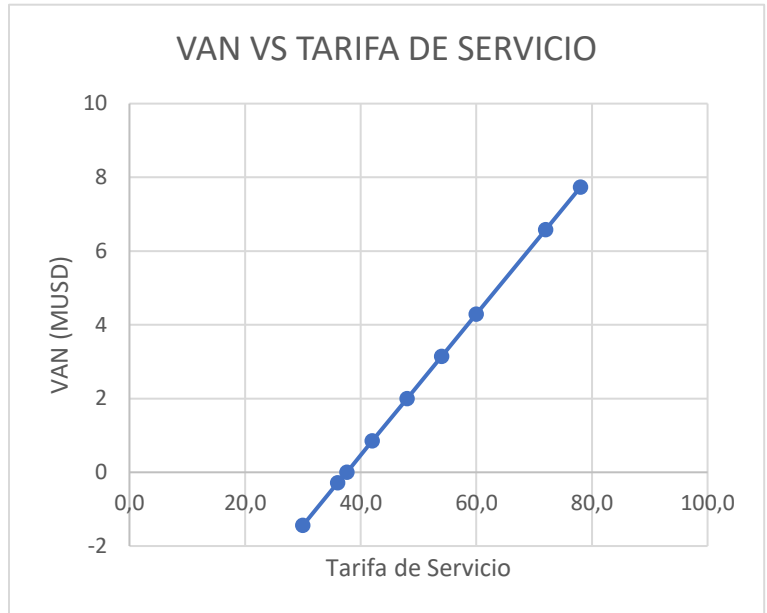
### 5.7.3 Precio de Venta de energía

Según lo establecido en el numeral 5.4 de la Ley Net Billing, se establece que la electricidad inyectada a la red se valora al 50% de la misma tarifa de distribución. No obstante, para aplicar la ley, también se requiere un acuerdo entre el propietario la tecnología ER y el distribuidor local para el pago de la potencia inyectada. En otras palabras, durante la negociación, el distribuidor podría ofrecer una tarifa menor en un descuento. En este análisis la pregunta que

importa es ¿Cuál sería la tarifa de facturación necesaria para que el proyecto sea económicamente viable?

Tabla 12 Variación tarifa de servicio en flujo de caja

Tarifa de servicio (CLP)	VAN (MUSD)
78,0	7,73
72,0	6,58
60,0	4,29
54,0	3,14
48,0	2
42,0	0,85
37,6	0
36,0	-0,29
30,0	-1,44



Fuente: Elaboración Propia

Punto de equilibrio para la tarifa de servicio es de \$37,6 CLP/kWh.

## **CAPITULO 6: EVALUACIÓN AMBIENTAL PROYECTO TURBINA DE VÓRTICE**

En base a lo expuesto en el capítulo 4, donde se indican todos los procesos para la construcción y operación de la MCHP, en este capítulo se analiza el impacto ambiental que tiene el desarrollo de este proyecto; se expondrán las normativas y regulaciones medioambientales que están vigentes en la legislación chilena. Si un proyecto debe ingresar al SEA se deben identificar los impactos ambientales que tienen el proyecto en el medio físico, biótico y humano, tanto en su etapa de construcción como de operación.

### **6.1 Regulación medioambiental**

El organismo gubernamental SEA, se encarga de fiscalizar y autorizar los proyectos que puedan generar o presentar al menos uno de los efectos característicos del artículo 11 de la Ley N°19.300, para ello se utiliza la “Guía para la descripción de centrales de generación de energía hidroeléctrica de potencia menor a 20 MW” (SEIA, 2021), para determinar si el proyecto debe someterse a una DIA o EIA.

De acuerdo con la Ley N°19.300:

Según el artículo 9°. *“El titular de todo proyecto comprendido en el artículo 10°debera presentar una DIA o una EIA, para obtener la autorización correspondiente”.*

Según el artículo 10°. (solo se mencionarán las que tengan relación con el proyecto)

*“Los proyectos que susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases deberán someterse al SEIA, son los siguientes:”*

- a) *Acueductos, embalses o tranques y sifones que deben someterse a la autorización establecidas en el artículo 294 del código de aguas, presas, drenajes, desecación, dragado, defensa o alteraciones significativas de cuerpos o cursos de aguas naturales.*
- b) *líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje y sus subestaciones*
- c) *Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW*

Según el artículo 11°. “Los proyectos o actividades enumerados en el artículo precedente requerirán la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, si generan o presentan a lo menos uno de los siguientes efectos, características o circunstancias:

- a) *Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos.*
- b) *Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.*
- c) *Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos.*
- d) *Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares y áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.*
- e) *Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.*
- f) *Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.*

## **6.2 Impactos del proyecto**

El proyecto desarrollado en este trabajo de título es una central de 5 kW de potencia, que se encuentra en un sector rural, a pocos kilómetros de la pequeña ciudad de Palmilla. Como el proyecto está pensado para ser aplicado en canales de regadíos, es decir, cursos de agua artificiales, con acueductos y bocatomas ya certificadas por las mismas asociaciones de canalistas, con un derecho consuntivo, como la potencia será entregada a la red de distribución, no es necesario construir una línea de transmisión eléctrica, mencionado esto, el

proyecto, de acuerdo con el artículo 10° de la ley 19.300, no es susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases.

Con lo mencionado anteriormente, se puede justificar que el proyecto, no está obligado a presentar una DIA o EIA, por la normativa legal del SEIA; sin embargo, para tener una aprobación o respaldar que el proyecto no genera un impacto ambiental del SEA, se puede presentar voluntariamente, una consulta de pertinencia, la cual se realiza cuando existen dudas con respecto a si el proyecto debe o no ingresar al SEIA. Para ello el titular del proyecto puede dirigirse al director regional del servicio, para justificar en base a los antecedentes del proyecto, si este debe o no ingresar al SEIA, *“La respuesta a la consulta de pertinencia es un pronunciamiento del Servicio de Evaluación Ambiental que se enmarca dentro de las declaraciones de juicio que realizan los Órganos de la Administración del Estado con Competencia Ambiental en el ejercicio de sus competencias”*, (SEA, 2022).

### **6.3 Carta consulta de pertinencia**

De acuerdo con lo indicado en el instructivo “Imparte instrucciones sobre las Consultas de Pertinencia de ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental” (OF. ORD DJ. N° 131.456/2013, de la Dirección Ejecutiva del Servicio de Evaluación Ambiental) se declara lo siguiente:

El proyecto energético utilizará el recurso natural renovable del canal Huicano, por medio de una Energía Renovable, ubicado en el sector rural aledaño a la comuna de Palmilla en la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins. El proyecto consiste en construir un bypass de concreto al canal artificial Huicano, para capturar, dirigir y devolver el flujo de agua a través de una turbina hidráulica de pasada, la superficie intervenida aledaña al canal será de 20 a 30 m<sup>2</sup>, para instalar una estación de producción eléctrica, la estructura de concreto contará con una reja de seguridad para que ninguna persona o ser vivo pueda caer

dentro, la potencia estimada del proyecto es de 5 kW, utilizando un caudal nominal de 0.885 m<sup>3</sup>/s, sin necesidad de represa. En el proceso de construcción será necesario equipamiento de maquinaria pesada, que provocará emisiones de gases contaminantes y levantamiento de material particulado, se realizará con mano de obra local, y no es necesario construir un sistema de agua potable o de alcantarillado. El proyecto será construido en sector previamente intervenido, por lo que no está protegido.

El proyecto no genera efectos ambientales significativos y las actividades de construcción estarán acotadas, cumpliendo en todo momento con la legislación ambiental aplicable.

No se genera ninguno de los efectos, características y circunstancias del artículo 11 de la ley 19.300 y sus modificaciones, que haga necesario su ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental para los efectos previstos en la Ley N° 19.300 modificada por la Ley N° 20.417.

Es importante destacar que, dentro de la gama de modelos de turbina disponibles de la empresa Turbulent, la máxima magnitud instalable es de 70 kW, siempre y cuando el caudal y altura sean los suficientes. Esto significa que, si un proyecto de 70 kW se lleva a cabo en un entorno urbano con acceso a líneas de transmisión, únicamente será requerida una carta de consulta de pertinencia ambiental.

## **CAPITULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En el presente capítulo se compilará la información de lo que ha sido la investigación en este trabajo de título. Tras una serie de análisis y evaluaciones, en este capítulo se consolidará la información para responder la pregunta ¿el proyecto presentado en el trabajo es viable en el ámbito técnico, ambiental y económico? ¿Se lograron cumplir los objetivos establecidos para el trabajo de título?

Al investigar el estado del arte de la tecnología se puede apreciar una prolongada trayectoria del concepto de vórtice desde el año 1924, donde el concepto de vórtice libre es utilizado por primera vez para generar energía, hasta el presente año, estamos hablando de casi 100 años de maduración.

Veremos a continuación, que, en base a las tres aristas principales de evaluación en la investigación (Evaluación Técnica, Económica y Ambiental) se logra determinar que el proyecto de una central hidráulica de pasada, utilizando una turbina de vórtice gravitacional es factible de implementar en la comuna de Palmilla.

### **7.1 Evaluación Técnica**

Es factible la instalación de la turbina en el sector de Palmilla, si bien las opciones eran escasas, dentro del criterio de canal de regadío, el canal Huicano es capaz de entregar el abastecimiento necesario para la instalación de la turbina Turbulent modelo 5 KW, demostrando tener un factor de planta teórico de 91%, de acuerdo con el caudal y altura bruta. La generación eléctrica que se obtendría podría fácilmente abastecer los consumos propios de la industria agrícola y proveer a los hogares del sector, con consumos mensuales de 400 kW/h y 172kW/h respectivamente (Anexo 7).

La selección de la tecnología de generación es viable porque, la tecnología tiene una larga trayectoria, tanto el concepto de energía hidráulica, como el concepto de turbina para vórtice, han sido implementadas hace más de 100 años. La ventaja mecánica del vórtice gravitacional es que el flujo circular concéntrico que produce el vórtice aumenta su velocidad y por ende su presión hacia el centro del vórtice, donde se ubica la turbina, obteniendo el aumento de la energía potencial para una mayor eficiencia en la generación de electricidad.

## **7.2 Evaluación Económica**

Tras realizar la evaluación económica del proyecto, se ha demostrado que el proyecto es viable, con los valores supuestos en la tabla N°8, resultando un VAN >0(4,3 MUS\$) y TIR = 18, 85% (mayor que la tasa de descuento del 10%).

El costo de inversión inicial se estima en US\$10.500 según la investigación realizada. Con la información detallada en los numerales 5.5 y 5.7.1 se determina un rango de inversión en el cual el proyecto pueda ser viable. El punto de equilibrio del VAN se alcanza cuando el costo de inversión es de US\$14.860, es decir, con un aumento de la inversión de un 41,5% el proyecto seguiría siendo viable económicamente.

En relación con la generación de la turbina, que viene dada directamente por el factor de planta, el punto de equilibrio, para que el proyecto siga siendo viable es con un factor de planta del 61,25%, es decir, la turbina puede tener una disminución del 30% de su funcionamiento para dejar de ser viable económicamente.

La tarifa para la energía inyectada a la red puede representar una dificultad, ya que, como se explicó anteriormente, la empresa distribuidora no está obligada a pagar lo mismo que ellos cobran, en este caso el punto de equilibrio se encuentra

en los 1 KW= 37,6 CLP, la cual corresponde al mínimo acuerdo posible, para que el proyecto sea viable, es decir, una variación máxima de 37%.

### **7.3 Evaluación Ambiental**

Tras una revisión de la normativa nacional con relación a los proyectos energéticos y su impacto ambiental, se logra determinar que el proyecto es viable, ya que por su capacidad instalada (5 kW), no es considerada bajo el criterio del artículo 11 de la Ley 19.300 para ingresar al SEIA y como se estaría trabajando en canales de regadíos en zonas de industria agrícola, las zonas donde el proyecto generaría algún tipo de impacto ambiental, es en zonas ya previamente intervenidas. Solo se debe realizar la carta de consulta de pertenencia.

### **7.4 Oportunidades y Barreras**

Un objetivo específico de la presente tesis fue identificar a través del trabajo de investigación las oportunidades y barreras del proyecto para así promover la implementación de proyectos de turbina de vórtice gravitacional.

#### **7.4.1 Oportunidades**

La principal oportunidad identificada es la posibilidad de autoabastecerse de energía eléctrica, es decir, la posibilidad de independencia de la red de distribución, que puede resultar ventajoso para cortes repentinos de electricidad.

Como se mencionó en el capítulo 4, la construcción de la central es principalmente una obra civil similar a la construcción de un canal, esto permite utilizar mano de obra local, lo que representaría un beneficio social a la comunidad donde se instale, en este caso Palmilla.

En la introducción del trabajo se hace la mención del profesor Jaime Espinoza, donde indica que, en su investigación, existe una oportunidad de 866

MW potencia instalable en canales de regadío en Chile, la cual es posible generar utilizando la tecnología expuesta en el trabajo.

El gobierno de Chile tiene el plan de bajar las emisiones de gases contaminantes (GEI y otros) y promover la instalación y el uso de las ER, en este caso el proyecto está en línea con el plan de desarrollo que tiene el país.

La esencia detrás de la turbina de vórtice no reside únicamente en la turbina en sí, sino en el ingenioso caracol que la alberga. Es en la construcción donde se encuentra el punto clave para generar y aprovechar el vórtice. Como se ha señalado previamente, estas obras civiles pueden ser llevadas a cabo por la mano de obra local, siempre que se cuente con el conocimiento adecuado.

#### **7.4.2 Barreras**

Una barrera considerable para el proyecto es la tarifa de inyección en la ley Net Billing, es una incertidumbre para la inversión del proyecto, ya que es un punto crítico de la viabilidad del proyecto; dado que la empresa distribuidora no está obligada a pagar un monto fijo por la energía inyectada.

La barrera identificada más probable al desarrollar el proyecto de una MCHP es el derecho de uso no consumo del agua, inclusive con la aceptación de los canalistas, se pueden presentar problemas de tramitación para obtener la aprobación para utilizar el recurso hídrico.

Para ello se enfoca el proyecto a los dueños de los derechos de uso del agua, sin embargo, el recurso está gestionado mayormente por asociaciones de canalistas o de regantes, esto significa una barrera en el sentido que se debe tener la autorización de todos los miembros para la instalación del proyecto.

Sumado a lo anterior, existe un gran desconocimiento, por parte de los dueños de los canales, con relación a las tecnologías de generación hidráulica, ya que tienen la percepción de que la instalación de un elemento de estas

características en el flujo de agua les provocaría pérdidas o que inclusive se les sería robada.

Para el financiamiento de los proyectos de ER, en general, se tiene bastante dificultad en conseguir préstamos de largo plazo, lo cual también dificulta a las asociaciones de canalistas poder acceder a estos créditos.

La importación de la tecnología puede presentar una barrera, son precios que suelen variar y se encuentra sujetos a condiciones mundiales cuando llega el producto.

Los modelos "Turbulent" que se presentan con una gran variedad, presentan ser una limitante para la generación de energía en este proyecto energético, ya que, en el escenario presentado, la generación nominal es de 5KW, ya que el modelo está diseñado para producir esa magnitud, inclusive ingresando mayor caudal o altura, no se produciría mayor potencia, sin embargo, el canal cuenta con una capacidad de generar más energía. Como se indicó en el numeral 4.3, se podrían generar más de 10 KW considerando que el caudal mínimo al que tiene derecho el canal es de 0,885 m<sup>3</sup>/s, pero para el modelo de 5 KW, son solo necesarios 0,7 m<sup>3</sup>/s, desaprovechando parte del caudal.

## CONCLUSIONES

Al finalizar el trabajo, se destaca la realización de una evaluación profunda de una turbina de vórtice gravitacional implementada en un canal de riego. Aunque los valores obtenidos no pueden precisarse completamente, ya que se basan en informes e investigaciones, los resultados indican que tanto la evaluación técnica, económica y ambiental respaldan la viabilidad del proyecto. Sin embargo, la evaluación económica reveló una amenaza a la inversión del proyecto. Esta situación se atribuye a las limitaciones establecidas por la normativa chilena para generaciones menores, específicamente bajo la Ley Net Billing. En este contexto, se observa una desventaja al valorizar la energía inyectada en la red, dado que el distribuidor tiene el control sobre la decisión de permitir el acceso del proyecto a su red de distribución. Este escenario conlleva a aceptar los términos de la empresa distribuidora al negociar la valorización de la energía inyectada.

Sin perjuicio de lo anterior, se logra demostrar que el concepto de turbina de vórtice gravitacional puede aplicarse a canales de regadíos u otros flujos de agua menores, para la generación de energía, que previamente fueron descartados por su caudal insuficiente. Sin embargo, existen barreras del tipo ambiental y económicas que habría que resolver, principalmente, el área administrativa y legal del proyecto, pero la barrera más relevante, es el factor humano, convencer a todos los miembros de la asociación de canalistas que el proyecto es una buena inversión y que su recurso hídrico no será desperdiciado.

Durante la evaluación técnica, se encontró el documento "LEVANTAMIENTO DE BOCATOMAS EN CAUCES NATURALES, ficha de registros cuenca río Rapel" (Ayala, Mayo 2000), que registra más de 100 bocatomas en la cuenca del río Tinguiririca, cada una con su propio canal y diversas características. Aunque la investigación se focalizó en la comuna de

Palmilla, se concluye que el principio del vórtice y la tecnología Turbulent podrían aplicarse a los distintos canales de riego de un solo río, revelando un abanico de oportunidades regionales. Cada bocatoma localizada a lo largo de distintos ríos o esteros podría convertirse en un sitio idóneo para la instalación de la turbina de vórtice gravitacional.

En relación a la evaluación ambiental, se puede concluir que mientras el proyecto sea considerado para ser instalado en un canal de regadío, tendrá una ventaja administrativa, sin embargo, para una aplicación completa de la tecnología y así promover la instalación de centrales hidráulicas con ER, se debería considerar ríos y cauces naturales; esto conlleva las dificultades de causar un impacto ambiental más relevante a la biodiversidad, pero lo que se ha demostrado en el trabajo, es que su instalación es simple y tiene un diseño para tener el menor impacto posible. Por lo anterior, sería posible la instalación de la turbina de vórtice gravitacional en zonas más alejadas que requieren electricidad, pero la instalación de líneas de alta tensión puede generar un problema o inclusive un impacto mayor a la naturaleza. Esto significaría un cambio relevante en el enfoque del proyecto, ya que, en adicional a los canales de regadíos, se podrían considerar ríos y esteros de menor tamaño. De ser posible se abriría a la posibilidad de promover una energía descentralizada a comunidades rurales con problemas de conexión y constantes caídas del suministro eléctrico. Los municipios pueden invertir en este tipo de tecnologías para sus instituciones de salud que requieren un abastecimiento constante de electricidad.

El propósito fundamental de este trabajo es fomentar la adopción de la turbina de vórtice, impulsando el uso de energía limpia y de bajo impacto en comparación con las voluminosas y disruptivas centrales hidroeléctricas de represa. La versatilidad de esta tecnología para adaptarse a diversos canales de riego facilita su promoción en distintos puntos del país, incluso en áreas remotas sin acceso a una red de distribución eléctrica. La metodología empleada en este

estudio, basada en la recopilación de información geográfica y fluviométrica, posibilita una evaluación rápida de la generación y rentabilidad al aplicar la turbina en otros canales, promoviendo así su expansión e instalación en todo el país.

Durante la investigación de la ley Net Billing, se destacó el ejemplo comúnmente utilizado para explicar su funcionamiento, centrado en la energía solar: durante el día, el hogar se abastece de su propia tecnología, y durante la noche, el titular puede mantener un suministro constante de electricidad. Al final del mes, se realiza un balance para determinar si se consumió más potencia de la red de lo que se inyectó, o viceversa. Extrapolando esta idea, se concluye que la generación de energía utilizando una central hidráulica, en este caso aplicando la tecnología de la turbina de vórtice, posee una ventaja al aplicar la Ley Net Billing. A diferencia de la energía solar, la turbina de vórtice es capaz de generar energía las 24 horas del día, la mayor parte de los días. Esto significa que, al realizar el balance mensual, el titular de la turbina de vórtice tendrá un resultado favorable.

Finalmente, por lo presentado a lo largo del texto, se puede concluir que los objetivos y alcances del trabajo de titulación han sido completados plenamente.

## RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan recomendaciones que han sido identificadas en el desarrollo de este trabajo.

La ley Net Billing es su nombre popular pero su nombre correcto en la Ley de Chile es “ LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS, CON EL FIN DE INCENTIVAR EL DESARROLLO DE LAS GENERADORAS RESIDENCIALES”, sin embargo la ley está pensada para obtener descuentos en la factura mensual, pero no para monetizar la energía inyectada a la red, dicho esto, no dando las facilidades a los generadores residenciales un beneficio o una tarifa fija de inyección no se incentiva de manera real el desarrollo de generadores residenciales. La recomendación que se entrega en este tema es, una modificación a la Ley Net Billing para que la energía excedente a favor de la medición tenga una valoración determinada, para que no sea una incertidumbre para la inversión del proyecto.

A diferencia de una pequeña central hidráulica de 20 MW con un valor de inversión cercano a los \$75 Millones de USD, el proyecto presentado de una turbina de vórtice gravitacional tiene un costo de \$10.500 USD aproximadamente \$9 Millones de CLP, lo cual en comparación es más asequible que a una central de 20 MW. Lo que se recomienda es un beneficio de ayuda gubernamental para la generación de auto consumo para canales de regadío, donde una vez instalada la central, se debe retribuir a la comunidad con inyección de energía.

En Chile, donde el agua se considera un recurso escaso, la implementación de un proyecto de turbina de vórtice gravitacional siempre enfrentará desafíos. Por lo tanto, la recomendación en este asunto consiste en proponer una modificación a los derechos de agua no consuntivos, similar a la estructura de la Ley Net Billing, que establece un límite máximo de 300 kW para

proyectos, se sugiere instaurar un criterio análogo para el uso de agua en turbinas de pasada. De esta manera, si la central genera menos de 100 kW, solo sería necesario obtener una autorización de construcción del propietario del recurso, acompañada de una compensación adecuada.

Como se destacó previamente, los individuos involucrados en la industria agraria a menudo carecen de conocimientos sobre las tecnologías destinadas a la generación de electricidad a partir del agua. Esta falta de familiaridad puede convertirse en un obstáculo significativo para el proceso de implementación de una turbina de vórtice gravitacional. Para superar esta barrera, se sugiere la realización de charlas informativas y programas de capacitación dirigidos a los responsables de las plantaciones en las diversas regiones de Chile. Esta iniciativa tiene como objetivo no solo brindar conocimientos sobre la tecnología de turbinas de vórtice gravitacional, sino también fomentar una comprensión más profunda de los beneficios y oportunidades asociadas. De esta manera, se espera facilitar y promover con éxito la instalación de estas turbinas en canales de todo Chile, aprovechando al máximo el potencial de esta innovadora fuente de energía hidroeléctrica.

Debido a la necesidad de importar completa la turbina, y como una manera de abaratar costos y ayudar al desarrollo tecnológico en el país de esta, se recomienda fomentar la industria metal mecánica para la fabricación de partes y piezas de este tipo de turbinas; ya que para el generador existe experiencia en el país en su fabricación. Lo anterior significa realizar un levantamiento de las maestranzas, a lo largo del país, que cumplan con los estándares de fabricación de estas turbinas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGRYD. (2018). Ignaguran primera turbina de energía micro hidroeléctrica rentable en Chile . *Revista AGRYD N°26*, 14-15.
2. Ayala, C. y. (Mayo 2000). *LEVANTAMIENTO DE BOCATOMAS EN CAUSES NATURALES, ficha de registros cuenca rio Rapel, subcuenca rio Tinguiririca*. Santiago: Gobierno de Chile Ministerio de obras publicas Direccion General de Aguas.
3. CEN. (Abril de 2024). *ERNC y otro récord: generación eléctrica en base a este tipo de energía llegó al 41% en lo que va de 2024*. Obtenido de Ministerio de Energía: <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/ernc-y-otro-record-generacion-electrica-en-base-este-tipo-de-energia-llego-al-41-en-lo-que-va-de-2024>
4. Centro de estudios tributarios. (2022). *GASTOS TRIBUTARIOS POR DEPRECIACIÓN*. Santiago, Chile.
5. CNE. (Noviembre 2023). *Resumen de estadísticas energeticas Region Libertador Gral. Bernardo O'Higgins*.
6. Comisión Nacional de Energía. (Abril 2022). *Aprueba Informe Técnico Definitivo que fija la Tasa de descuento a que hace referencia el artículo 118° de la Ley General de Servicios Eléctricos*. Santiago, Chile: Comisión Nacional de Energía.
7. Comisión Nacional de Energía y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. (Marzo 2009). *Las ERNC en el mercado eléctrico chileno*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile.
8. Díaz, C. G. (2008). *Características de muros de hormigón armado diseños en Chile*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

9. División de Hidrología . (2021). *Pronóstico de caudales de deshielo 2021-2022*. Santiago, Chile: MOP DGA.
10. Energía, M. d. (2014). *Ministerio de energía Ley 20.571 para la generación distribuida* . Obtenido de minenergia.cl: <https://minenergia.cl/ley20571/>
11. GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014 Informe de síntesis*. Suiza: OMM.
12. Gulliver, J. S., & Mays, L. W. (1991). *Hydropower Engineering Handbook*. McGraw-Hill.
13. Jara, W. (2023). *Costos de una Central Hidráulica*.
14. Mery, H. (2013). *Hidráulica aplicada al diseño de obras*. Santiago: RIL.
15. Mery, H. (2013). *Hidráulica aplicada al diseño de obras*. Santiago, Chile: RIL Editores.
16. Ministerio de Energía. (2012). *Ley 21.118 "MODIFICA LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS, CON EL FIN DE INCENTIVAR EL DESARROLLO DE LAS GENERADORAS RESIDENCIALES"*. Chile.
17. Ministerio de Energía GOB. (Marzo 2020). *Informe de costos de tecnologías de generación*. Santiago, Chile.
18. Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2009). *Fundamentals of fluids mechanics. (6a ed)*. Jefferson City, EE.UU.: Jhon Wiley & sons inc.
19. Nagler, F. (1924). *Estados Unidos Patente nº 550.612*.
20. Reiffenstein, M. (1936). *Austria Patente nº 699.964*.
21. Sanders, D. A. (1978). *Estados Unidos Patente nº 734.754*.

22. SEA, G. (2022). *Servicio de Evaluacion Ambiental*. Obtenido de Consulta de pertinencia: <https://sea.gob.cl/consulta-de-pertinencia/que-es-una-consulta-de-pertinencia>
23. SEIA. (2021). *Guía para la descripción de centrales de generación de energía hidroeléctrica de potencia menor a 20MW*. Santiago. Chile: Cabeza S.A.
24. Slachmuylders, G. (2017). *Bélgica Patente nº WO 2017/ 09793*.
25. TRITEC INTERVENTO. (Julio de 2021). *Como funciona la ley NetBilling*. Obtenido de Tritec Intervento: <https://tritec-intervento.cl/como-funciona-la-ley-netbilling/>
26. Verreydt, J., & Slachmuylders, G. (2015). *Turbulent company S.p.A*. Bélgica.
27. Zotlöterer, F. (1978). *Suiza Patente nº CH 699.133 B1*.

## ANEXOS

### Anexo 1. Desarrollo para ecuación (4) de Potencia Eléctrica:

Valores indicados en el numeral 1.2,

turbina ( $\eta_T = 90\%$ ) y el generador ( $\eta_G = 98\%$ )

$$P.E. = N * \eta_G$$

$$N = \gamma * Q * H_n * \eta_T$$

$$H_n = H_b - (j_e + j_s)$$

$$P.E. = \gamma * Q * H_n * \eta_T * \eta_G$$

Donde ( $j_e + j_s$ ) corresponde a las pérdidas de carga por aducción, estimadas en un 5%

$$H_n = H_b * 0,95$$

$$N = \gamma * Q * H_b * 0,95 * 0,90$$

$$P.E. = \gamma * Q * H_b * 0,95 * 0,90 * 0,98$$

$$P.E. = 8,2 * Q * H_b$$

Donde:

$\gamma$ : Peso específico del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

N: Potencia mecánica (w)

Q: Caudal medio ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

P.E.: Potencia Eléctrica (w)

$H_n$ : Altura neta (m)

$\eta$ : Rendimiento

$H_b$ : Altura bruta (m)

## Anexo 2. Análisis del Vórtice:

Como se muestra en la figura 36, se observa un campo de flujo en el cual las líneas de corriente son círculos concéntricos, la velocidad potencial ( $\phi$ ) y la función de corriente ( $\psi$ ) son:

$$\phi = K\theta \quad \text{y} \quad \psi = -K \ln r$$

donde K es una constante y las componentes de velocidad son  $v_r$  y  $v_\theta$ , en ese caso, ya que las líneas de corriente son círculos concéntricos, entonces:

$$v_r = 0 \quad \text{y} \quad v_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial x\theta} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{K}{r}$$

En el caso de  $r = 0$ , ocurre una singularidad donde la velocidad se vuelve infinita

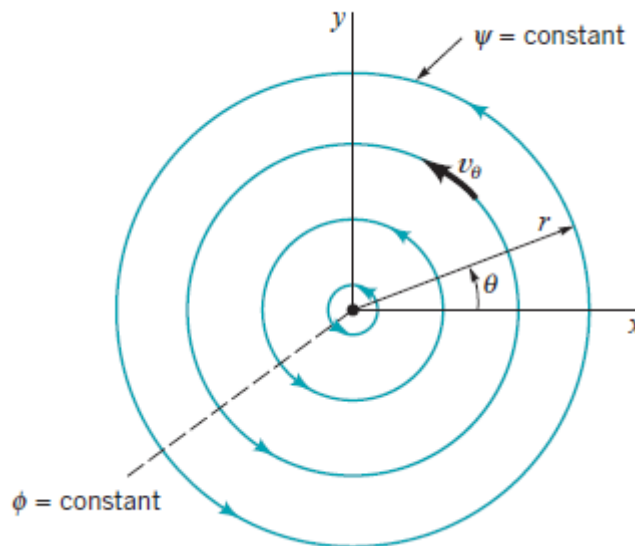


Figura 36 Patrón de flujo  
Fuente: *Fundamentals of fluid mechanics (Munson-Young)* (2009)

Un término asociado al movimiento del vórtice es la circulación ( $\Gamma$ ), es definida como la integral lineal de la componente tangencial asociada a la velocidad tomada cerca de una curva de flujo,  $\Gamma$  es expresada como:

$$\Gamma = \oint_c^{2\pi} V ds$$

Para el caso de un vórtice libre, el cual se estudia en este trabajo de título, con  $v_\theta = K/r$ , la circulación al rededor del camino circular de radio  $r$  es:

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} \frac{K}{r} (r d\phi) = 2\pi K$$

Le ecuación anterior muestra que la circulación no es cero, y la constante  $K = \Gamma/2\pi$ , la velocidad potencial y la función de corriente para el vórtice libre son expresadas en términos de circulación:

$$\phi = \frac{\Gamma}{2\pi} \theta \quad \text{y} \quad \psi = -\frac{\Gamma}{2\pi} \ln r$$

### Anexo 3. Bocatomas del rio Tinguiririca

<b>REGISTRO DE BOCATOMAS</b>		1 de 4
<b>1. ANTECEDENTES GENERALES</b>		
<b>BOCATOMA DEL CANAL: <u>EL HUIQUE - LAS TRANCAS</u></b>		
CUENCA:	<u>RIO RAPEL</u>	FECHA: <u>23-09-99</u>
SUBCUENCA:	<u>RIO TINGUIRIRICA BAJO</u>	
SUBSUBCUENCA:	<u>RIO TINGUIRIRICA ENTRE LO MOSCOSO Y E. CHIMBARONGO</u>	
FUENTE:	<u>RIO TINGUIRIRICA</u>	
SECCION:	<u>PRIMERA</u>	CODIGO: <u>06031</u>
REGISTRO N°:	<u>TIN-1-44</u>	N° DE ORDEN: <u>44</u>
<b>ASOCIACION DE CANALISTAS CANAL HUICANO</b>		
NOMBRE O RAZON SOCIAL DEL PROPIETARIO O RESPONSABLE LEGAL DE LA OBRA		
<b>2. UBICACION DE LA OBRA</b>		
REGION:	<u>VI</u>	
PROVINCIA:	<u>COLCHAGUA</u>	
COMUNA:	<u>PALMILLA</u>	
COORDENADAS UTM : NORTE: <u>6.169.185</u> m      ESTE: <u>284.949</u> m		
DATUM: <u>SAM-56</u> HUSO: <u>19</u> PDOP: <u>1.5</u>		
FECHA: <u>23-09-99</u> HORA: <u>13:30</u>		
CARTA IGM - Escala 1:50.000: <u>SANTA CRUZ</u>		
ACCESO A BOCATOMA: <u>X</u> FACIL      DIFICIL		
Descripción: <u>Junto al camino a Niquen, 300 m aguas abajo del puente sobre el canal Manzano-Higuerilla.</u>		

**REGISTRO DE BOCATOMAS**

2 de 4

**3. ANTECEDENTES TECNICOS**

TIPO DE BOCATOMA:	<input checked="" type="checkbox"/> Permanente	<input type="checkbox"/> Temporal	<input type="checkbox"/> Emergencia
TIPO DE CAPTACION:	<input checked="" type="checkbox"/> Gravitacional	<input type="checkbox"/> Bombeo	Otro: _____
RIBERA:	<input type="checkbox"/> Izquierda	<input checked="" type="checkbox"/> Derecha	
ESTADO:	<input checked="" type="checkbox"/> Bueno	<input type="checkbox"/> Regular	<input type="checkbox"/> Malo
OBRA DE TOMA:	<input type="checkbox"/> No	<input checked="" type="checkbox"/> Si	
MATERIAL :	<input checked="" type="checkbox"/> Hormigón	<input type="checkbox"/> Madera	<input type="checkbox"/> Mampostería
	Otro: _____		
DIMENSIONES:	Alto: <u>8,00</u> m	Ancho: <u>5,00</u> m	

TIPO DE OBRA DE DESVIACION:	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> Barrera Frontal	<input checked="" type="checkbox"/> Lateral
	<input type="checkbox"/> Patas de Cabra	<input checked="" type="checkbox"/> Pretil Material Fluvial	Otra: _____
ESTADO:	<input checked="" type="checkbox"/> Bueno	<input type="checkbox"/> Regular	<input type="checkbox"/> Malo

COMPUERTA DE ADMISION:	<input type="checkbox"/> No	<input checked="" type="checkbox"/> Si	Cantidad: <u>3</u>
MATERIAL:	<input checked="" type="checkbox"/> Metálica	<input type="checkbox"/> Madera	
SISTEMA DE IZAMIENTO:	<input checked="" type="checkbox"/> Con Mecanismo	<input type="checkbox"/> Manual	
ESTADO:	<input checked="" type="checkbox"/> Bueno	<input type="checkbox"/> Regular	<input type="checkbox"/> Malo
OBRA DE DEVOLUCION A LA FUENTE:	<input checked="" type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> Si	
	<input type="checkbox"/> Compuerta	<input type="checkbox"/> Vertedero	

SECCION DE AFORO:	<input checked="" type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> Si	Tipo: <u>Sección Rectangular</u>
ESTADO:	<input checked="" type="checkbox"/> Bueno	<input type="checkbox"/> Regular	<input type="checkbox"/> Malo
SECCION DE CANAL EN BOCATOMA:	<input checked="" type="checkbox"/> Sin Revestir	<input type="checkbox"/> Revestido	
FORMA:	<input type="checkbox"/> Rectangular	<input type="checkbox"/> Trapecial	Otra: <u>Semitrapecial</u>
DIMENSIONES:	Alto: <u>8,00</u> m	Ancho: <u>7,00</u> m	

**4. CAUDALES**

CAUDAL DE EXTRACCION AUTORIZADO:	
Derechos Permanentes	<u>300</u> (Acciones) o _____ (l/s)
Derechos Eventuales	<u>2.000</u> (l/s)
CAUDAL DE EXTRACCION EFECTIVO:	<u>885</u> (l/s)

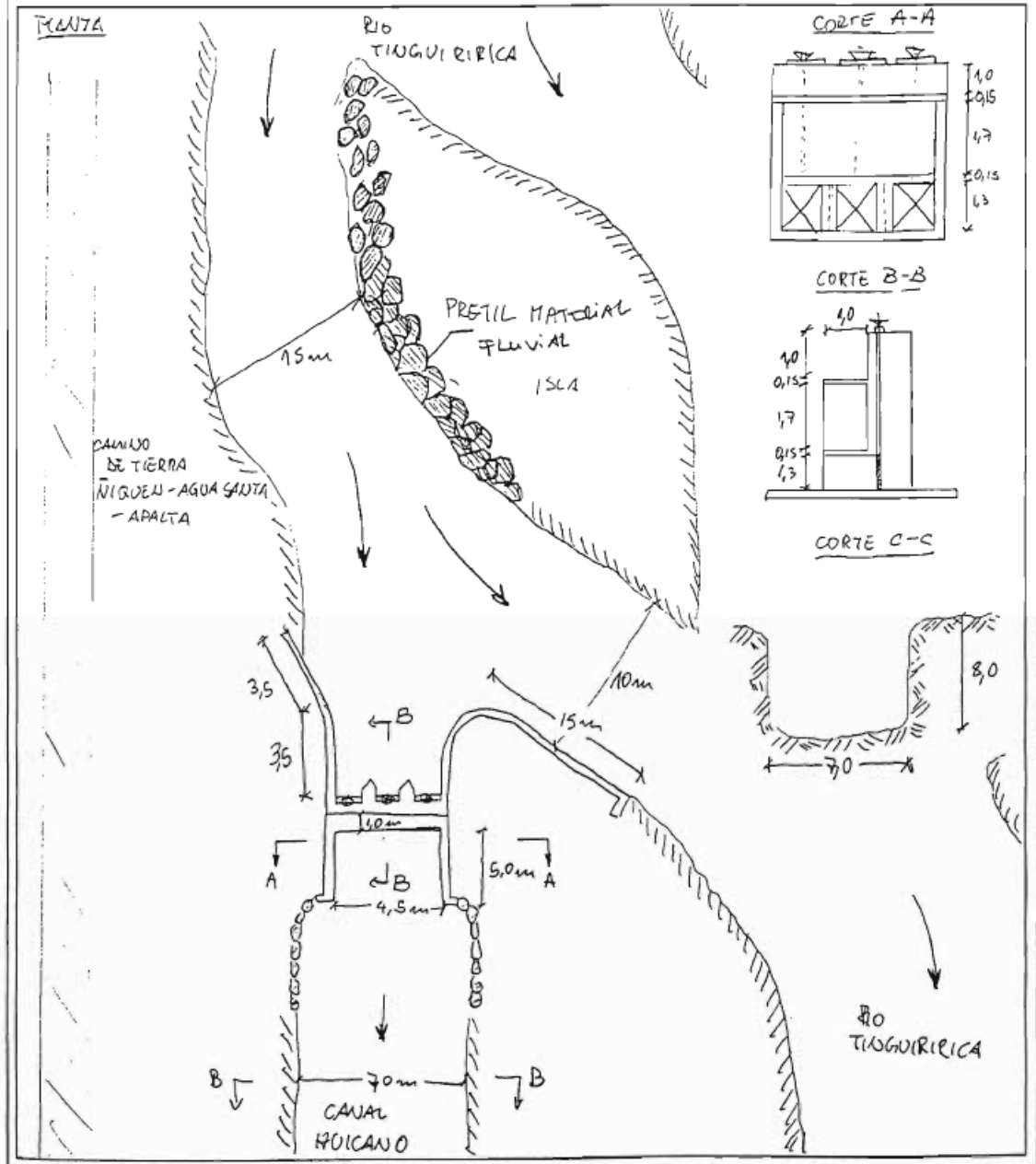
USO DE LA OBRA:	<u>RIEGO</u>
-----------------	--------------

OBSERVACIONES:	<u>Posee además de las 300 acciones del río Tinguiririca un total de 2.750 acciones procedentes del estero Chimbarongo.</u>
	_____
	_____

MONOGRAFIA BOCATOMA

BOCATOMA CANAL: EL HUIQUE - LAS TRANCAS

REGISTRO N°: TIN-1-44



REGISTRO DE BOCATOMAS

4 de 4

BOCATOMA CANAL: EL HUIQUE - LAS TRANCAS  
REGISTRO N°: TIN-1-44



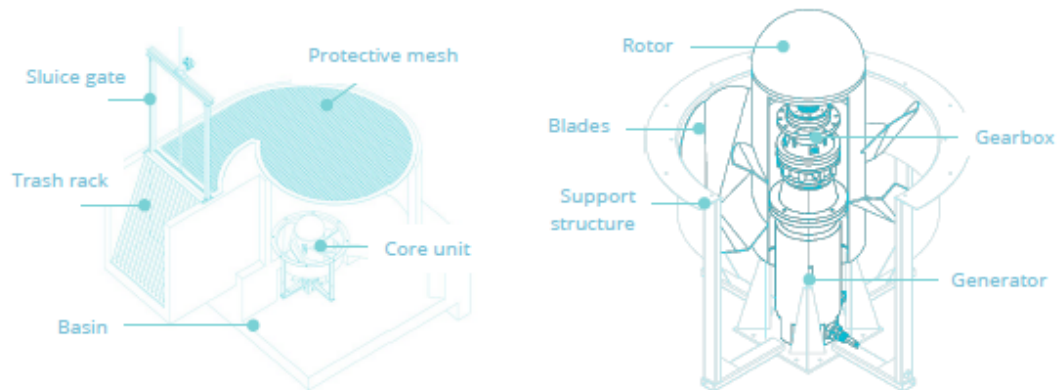
FOTO : VISTA GENERAL DE LA BOCATOMA



## Anexo 4. Especificaciones Técnicas de los productos Turbulent.



### 5 - 70 kW Vortex Turbine



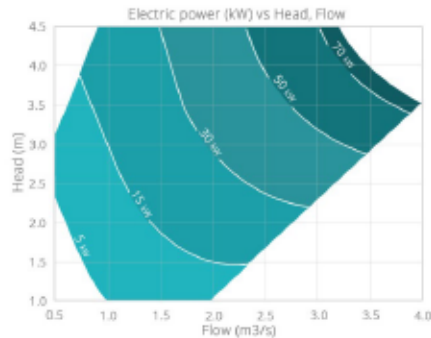
- Fish-friendly hydrodynamic rotor with flow-optimized blades and low turning speeds
- Compact low-noise submerged design.
- Core unit designed to operate for over 25 years
- Submersible gearbox and generator outfitted with Double Eagle Burgmann\* mechanical face seals that can withstand any type of flood
- Secondary sealing system with multiple layers of protection against fresh and brackishwater debris and sand designed by SKF for continuous heavy-duty use in harsh environments.
- All rotor and casing parts made from stainless steel used in the food industry
- Carbon steel parts have an impact- and abrasion-resistant coating
- Equipped with maintenance-free induction generator from European manufacturers.

Vortex turbine models 5 to 70 kW	Value	Unit
Min Flow	0.7	m <sup>3</sup> /s
Max Flow	4	m <sup>3</sup> /s
Min Head	1	m
Max Head	4.4	m
Min. Speed	80	rpm
Blade tilt angle range	(-14) to 14	deg
Stainless steel type	304	-

Representative Models	5 kW	15 kW	30 kW	50 kW	70 kW	Unit
Turbine hydraulic output	5.8	17.4	34.9	56.8	79.5	kW
Electrical output	5	15	30	50	70	kW
Maximal Energy generation per year	40,000	120,000	240,000	400,000	560,000	kWh
Nominal flow	0.7	1.5	2.2	3.1	3.8	m <sup>3</sup> /s
Nominal head	1.6	2	2.8	3.25	3.7	m
Impeller Diameter	800	1140	1200	1300	1500	mm
Rotor Height	385	550	580	625	730	mm
Vortex turbine core weight	135	275	300	360	475	kg
Generator and gearbox weight	180	350	600	950	1200	kg
Electrical cabinet. weight	220	270	330	390	480	kg

A wide range of other head and flow combinations is available (see power range graph below). All turbines can easily be transported by shipment and on a small truck. Smaller units fit on a pick-up truck.

## Power Range and Maintenance



Maintenance item	Maintenance interval
Gearbox oil change	After every 6 months
Retightening all bolts	Once every year
Generator visual check	Once every year
Replacement of seals	After every 2 years
Re-greasing of gearbox bearings	After every 2 years
Electrical controls check	After every 2 years
Replacement of bearings	After every 3 years

## Power Electronics



### On-Grid - Cost-saving with the cleanest possible electricity

A good quality grid is available near the turbine installation & consumers. The turbine will decrease your electricity bill considerably. The backbone is an induction generator that is coupled to the grid and will provide over 90% uptime.



### Basic Off-Grid - Reliable remote electricity, hydro only

A top quality micro-grid providing energy right from the water with the following features:

- Pure Sine Wave Inverter
- Controlled dump loads + Power Factor Correction (PFC) for optimal load balancing
- Starting battery for generator



### Smart On/Off-Grid - Reliable electricity anywhere, combined hydro

A top quality micro-grid compatible with other power sources and energy storage. It has the same functionalities of the basic off-grid solution, with the following additional features:

- Peak consumer loads up to 3x turbine power, ensuring energy availability during peak demand
- Batteries dimensioned for peak-shaving and increased uptime till 99%
- Can be grid-connected with uninterrupted switching between on and off-grid.
- Easily integrates with other power sources like solar, wind, diesel, ...

The information in this document is subject to change without notice and should not be construed as a commitment by TURBULENT NV. Our technology was designed with the collaboration of several Universities and recognized by MIT for its promising innovations. All components are produced with partners and suppliers following ISO 9001:2015 standards.



Co-funded by the Horizon 2020 programme of the European Union

[www.turbulent.be](http://www.turbulent.be)

[wim.heyvaert@turbulent.be](mailto:wim.heyvaert@turbulent.be) | TEL: +32 499 64 65 20

Wijgmaalsesteenweg 6, 3012 Wilsede, Belgium

**Anexo 5.** Plano de Modelo para Micro central hidráulica de pasado utilizando la tecnología Turbulent modelo 5 KW

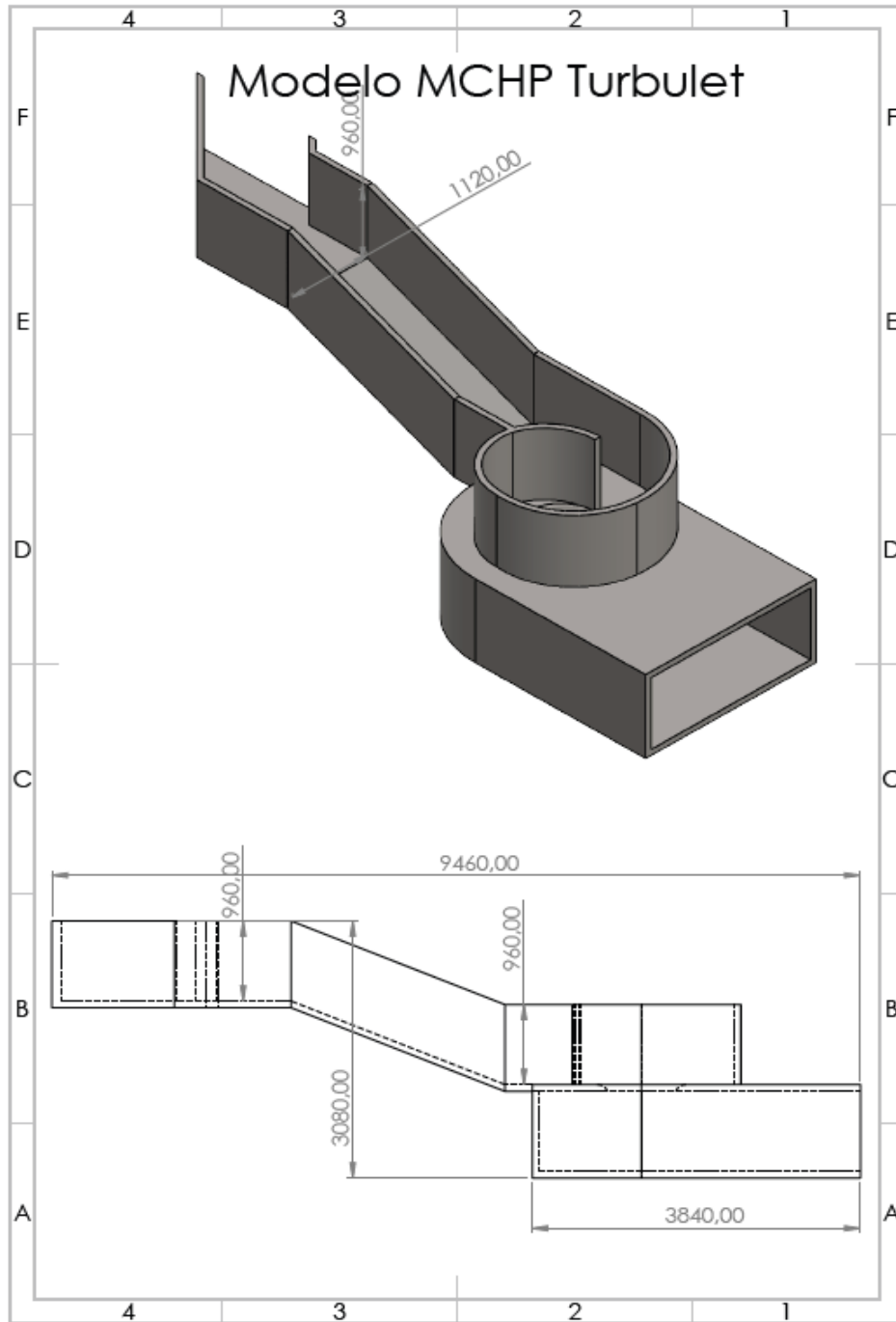


Figura 37 Plano de Plano de Modelo para Micro central hidráulica de pasado utilizando la tecnología Turbulent modelo 5 KW

Fuente: Elaboración propia en base a Turbulent

## **Anexo 6. Funcionamiento de la Ley Net Billing**

I. Generación de energía: Los usuarios que dispongan de su propio equipamiento para la generación de energía, siempre y cuando esta sea ER y cumpla con los requisitos mínimos de tecnología y seguridad, tanto para los clientes como las instalaciones eléctricas, podrán abastecer su propio consumo electricidad, manteniendo asimismo la conexión con el empalme de la red de distribución a la que pertenece, la capacidad instalada por cliente o usuario final no podrá superar los 300 kilowatts.

II. Uso y exceso de energía: La energía generada será utilizada por el consumo del hogar o por las operaciones del titular, mientras se esté generando energía, pero si la fuente generadora se detiene, el hogar consumirá su electricidad de la red. En el caso de que se genere más energía de la que se consume al final del mes o balance, el exceso de energía generada es inyectado a la red eléctrica.

*“Las inyecciones de energía que se realicen en conformidad a lo dispuesto en el presente artículo serán valorizadas al precio que los concesionarios de servicio público de distribución traspasan a sus clientes regulados, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 158”. Ley 20.571*

III. Medición de energía: El sistema Netbilling funciona con una conexión directa a la red de distribución locales, hay que considerar que además de solventar los gastos de la fuente de generación, la ley Netbilling, indica que toda obra adicional y adecuación que sea necesaria realizar para permitir la conexión e inyección de los excedentes a los medios de generación, deberán ser cubiertos por el titular de las instalaciones, en las cuales no deben ser afectados otros clientes.

El medidor de energía funcionará de manera bidireccional, es decir, medirá de manera paralela, la energía que la propiedad utilice y la energía de excedente que sea inyectada a la red.

- IV. Facturación: En la facturación de electricidad mensual se entregará un balance donde se indicará la cantidad de energía utilizada e inyectada.

*“Las inyecciones de energía valorizadas deberán ser descontadas de la facturación correspondiente al mes en el cual se realizaron dichas inyecciones. De existir un remanente a favor del cliente, el mismo se imputará y descontará en la o las facturas subsiguientes. Los remanentes a que se refiere este artículo deberán ser reajustados de acuerdo al Índice de Precios del Consumidor, o el instrumento que lo reemplace, según las instrucciones que imparta la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.” Ley 21.118*

Se acredita la cantidad de energía que se ha inyectado en la red, la cual tiene un efecto directo en la cuenta de la luz, descontándola de la energía que has consumido. Dependiendo de las políticas que se adopten con la concesionaria que presta los servicios de distribución por medio de un contrato, de acuerdo el excedente si se inyecta más energía de la que consumes, se podría recibir un crédito en tu cuenta o una compensación monetaria.

*“Los remanentes de inyecciones de energía valorizados conforme a lo indicado en el artículo precedente que, transcurrido el plazo señalado en el contrato, no hayan podido ser descontados de las facturaciones correspondientes, deberán ser pagados al cliente por la concesionaria de servicio público de distribución respectiva. Para tales efectos, la concesionaria deberá remitir al titular un documento nominativo representativo de las obligaciones de dinero emanadas de las inyecciones no descontadas, salvo que el cliente haya optado por otro mecanismo de pago en el contrato respectivo.” Art 149 Ley 21.118.*

“Para un cliente BT1 -o residencial- significa que los excedentes tendrán un valor cercano al 50% del valor al cual compra la electricidad a la distribuidora” (TRITEC INTERVENTO, 2021)

- V. Aporte Ley ERNC: En el caso que la generación de energía inyectada sea en base a una ERNC, podría ser considerado por las empresas eléctricas instaladas en el sistema eléctrico con capacidad instalada superior a 200 MW, a modo del cumplimiento de la Ley 20.257 artículo 150°, es decir, la energía generada inyectada puede ser vendida a través de la Ley ERNC a las empresas generadores que no utilizan ERNC para que ellas puedan acreditar que el 10% de la energía que ellos inyectan es proveniente de una ERNC. La respectiva concesionaria deberá remitir al cliente de manera anual, un certificado que da cuenta de las inyecciones realizadas por el cliente a través del medio de generación ERNC.

*“El certificado de inyecciones leídas constituirá título suficiente para acreditar inyecciones para el cumplimiento de la obligación establecida en el inciso primero del artículo 150 bis, por los valores absolutos de las inyecciones indicadas en él. Para tales efectos, el cliente podrá convenir, directamente, a través de la distribuidora o por otro tercero, el traspaso de tales inyecciones a cualquier empresa eléctrica que efectúe retiros en ese u otro sistema eléctrico. El reglamento establecerá los procedimientos que deberán seguirse para el traspaso de los certificados y la imputación de inyecciones pertinente.”*  
Art 149° quater Ley 20.571.

## **Anexo 7. Referencias de Tabla N°8 Parámetros de la evaluación económica.**

Analizando el balance energético de la región de O'Higgins, se utiliza como orientación el "Resumen estadísticas energéticas región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins" (CNE, Noviembre 2023) compilado por "Energía Abierta", una fuente gestionada por el CNE que determina el panorama de la generación eléctrica y el consumo a nivel nacional. Según este informe, el consumo eléctrico promedio en la región por hogar se sitúa en 172 kWh/mes. el valor estimado para el consumo de la región esta entregado por un valor referencial de 180 kWh/m, valorizado en \$21.955CLP por la tarifa del tipo BT1, la cual es la tarifa más simple de la CGE, con una variación de 2.5% entre sus distintas comunas de la región, con esta información se puede considerar la siguiente relación; 1 kWh=\$121,97 CLP.

De acuerdo con la Ley Net Billing, la tarifa de inyección tendrá un valor cercano al 50% del valor de compra. 1 kWh = 60 CLP.

Considerando el consumo promedio mensual de un hogar residencial en la región de 172 kWh, se realiza una comparación aproximada al consumo industrial de una empresa agrícola que suele requerir más electricidad debido al uso de maquinaria, sistemas de riego, iluminación, entre otros. Una empresa agrícola podría consumir varias veces más electricidad que una residencia, dependiendo de la escala de operación En este caso se tomará el supuesto que la asociación de canalistas a la que se le ofrece el proyecto tiene un consumo eléctrico mensual de 400 kWh, una tarifa de \$48.788 CLP.

Si se consideran los gastos de inversión previo a la puesta en marcha y un gasto de operación determinado por el 1% de inversión, se obtiene un gasto anual de \$105 US, considerando la vida útil de la turbina como lo indica su fabricante de 25 años.

La depreciación tributaria es un concepto contable y fiscal que refleja la disminución del valor de un activo a lo largo del tiempo. En términos simples, representa la forma en que las empresas reconocen y registran la pérdida de valor de sus activos, como edificios, maquinaria o equipos, en sus libros contables para propósitos fiscales.

Como es indicado en el texto “Gastos tributarios por depreciación” (Centro de estudios tributarios, 2022) ,la idea detrás de la depreciación tributaria es que los activos tienen una vida útil limitada y pierden valor con el tiempo debido al desgaste, obsolescencia u otros factores. En lugar de registrar la pérdida de valor de manera inmediata, las empresas distribuyen esta pérdida a lo largo del tiempo, lo que les permite reflejar de manera más precisa el costo real del uso de esos activos en sus estados financieros.

Al utilizar la depreciación tributaria, las empresas pueden deducir parte del costo de sus activos de sus ingresos gravables cada año, lo que reduce su base imponible y, en última instancia, disminuye los impuestos que deben pagar. Esto proporciona a las empresas un incentivo fiscal para invertir en activos productivos y, al mismo tiempo, reconoce la realidad de que los activos pierden valor con el tiempo. En este caso se aplica la “Depreciación Normal”.

La depreciación normal es de carácter general, todos los contribuyentes pueden sujetar sus bienes a este régimen. Esta depreciación no distingue si se trata de bienes nuevos o usados o de pequeñas, medianas o grandes empresas, solo requiere que se trate de una empresa que determine su renta efectiva según contabilidad completa<sup>7</sup>. Una vez iniciada la depreciación normal, el contribuyente podrá optar por aplicar algún tipo de depreciación acelerada, siempre que cumpla los requisitos para dichos efectos, según se detalla a continuación.

Otro parámetro que se considera son los impuestos, asociados a la industria agrícola a la que pertenece la asociación de canalistas del canal Huicano, como una empresa que tributa impuestos de primera categoría y como

una junta de accionistas que dividirán las utilidades, se considera el impuesto de sistema renta atribuida de 25% al EBITDA (Earnings Before Interests, Taxes, Depreciation and Amortization), es decir, “Ganancias antes de interese, impuestos, depreciación y amortización.

De acuerdo con un informe técnico realizado por la CNE, el factor de la tasa de descuento anual para proyectos con energía renovable “No podrá ser inferior al siete por ciento ni superior al diez por ciento (7% - 10%). (Comisión Nacional de Energía, Abril 2022) En este caso el profesor guía recomienda considerar una tasa de descuento anual de un 10% para la evaluación económica.