



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

CRITERIOS HIDRÁULICOS PARA PROYECTOS DE TECNOLOGÍAS DE
MICROGENERACIÓN EN INFRAESTRUCTURA DE RIEGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DARÍO GASTÓN VILLANUEVA RIQUELME

PROFESOR GUÍA:

CRISTIAN FERNANDO HADAD WESTPHAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ARTURO JORQUERA ACUÑA

RODRIGO ARBUCH MEZA

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mención Hidráulica,
Sanitaria y Ambiental
POR: Darío Gastón Villanueva Riquelme
FECHA: 21/10/2019
PROFESOR GUIA: Cristian Hadad Westphal

CRITERIOS HIDRÁULICOS PARA PROYECTOS DE TECNOLOGÍAS DE MICROGENERACIÓN EN INFRAESTRUCTURA DE RIEGO

La energía cumple un rol importante dentro del desarrollo de un país, más aún, si ésta es producida a través de Energías Renovables No Convencionales, bien lo saben las autoridades chilenas, quienes han impulsado leyes que fomentan su uso. Con el mismo objetivo se realiza este trabajo, centrado en la generación de hidroelectricidad a baja escala. En éste se describen criterios hidráulicos, técnicos y económicos que permiten orientar la Implantación de Tecnologías de Microgeneración.

Para lograr el objetivo, la metodología a seguir contiene una revisión bibliográfica que en este trabajo se expresa a través de un catastro con 7 tecnologías de microgeneración. En éste se incluyen sus principales características, las que permiten diferenciar un equipo de otro.

Los Criterios encierran variables a considerar en fases tempranas de la ingeniería. Los criterios descritos son selección de equipos a través de Ábacos, un criterio basado en la infraestructura de riego existente, también se detalla uno económico y el último elemento descrito es un análisis multivariable que da la posibilidad de cuantificar las bondades de un equipo por sobre el otro.

Para finalizar se hace una aplicación de los criterios a dos casos que disponen de alto potencial de microgeneración que no está siendo aprovechado, estos casos son: Canal San Rafael - Los Cantos (230 [kW]) y Canal Hurtado (300 [kW]), ambos en la región de Valparaíso.

El equipo que más fama posee en Chile es la turbina de Flujo Cruzado y en este texto se puede inferir el por qué. Pero se elevan como alternativas viables, tecnologías que no están disponible en Chile, como la turbina Tipo Sifón y el Tornillo de Arquímedes.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1.	Objetivos	2
1.2.	Metodología.....	2
1.3.	Alcances	3
2.	Revisión Bibliográfica.....	5
2.1.	Aspectos fundamentales de la Generación Hidroeléctrica.....	5
2.1.1.	Potencia instalada y Energía producida.....	6
2.1.2.	Clasificación de las plantas de generación hidroeléctrica	8
2.1.3.	Potencial de la Micro Generación Hidroeléctrica, ventajas y desventajas	10
2.2.	Fomento de Micro Hidroelectricidad en Chile.....	12
2.2.1.	Ley General de Servicios Eléctricos.....	12
2.2.2.	Proyectos de riego con fuentes de energías renovables no convencionales (Ley 18.450)	13
2.3.	Aspectos técnicos y administrativos por considerar para la instalación de una Microcentral	14
2.3.1.	Antecedentes básicos.....	15
2.3.2.	Aspectos administrativos y normativos por considerar para la instalación de una microcentral.....	16
2.4.	Catastro de turbinas utilizadas para la generación hidroeléctrica	18
2.4.1.	Turbina CrossFlow	22
2.4.2.	Turbina Tornillo de Arquímedes	24
2.4.3.	Turbina Turgo.....	27
2.4.4.	HydroEngine.....	28
2.4.5.	Turbina de Vórtice Gravitacional.....	31

2.4.6.	Turbina Tipo Sifón	33
2.4.7.	Bomba como turbinas (BCT)	35
2.4.8.	Turbina Hidrocinética.....	37
3.	Criterios para la Implantación de Tecnologías de Microgeneración en Infraestructura de Riego	39
3.1.	Elección de tecnología de microgeneración a partir de ábaco.	40
3.2.	Elección de Tecnología de Microgeneración a partir de la infraestructura existente	41
3.2.1.	Obras de Derivación y Tomas de Agua.....	43
3.2.2.	Canales con fuertes pendientes.....	44
3.2.3.	Puentes.....	44
3.2.4.	Estaciones de aforo.....	45
3.3.	Elección de Tecnología de Microgeneración a partir de análisis económico	47
3.3.1.	Costos de inversión.....	47
3.3.2.	Costos Anuales	48
3.4.	Criterio para la implantación de Tecnologías de Microgeneración a partir de Análisis Multicriterio.....	49
3.4.1.	Relación entre la energía producida y el costo de inversión [kWh/\$].....	49
3.4.2.	Disponibilidad de servicio técnico	50
3.4.3.	Vulnerabilidad de acuerdo con el lugar de emplazamiento:.....	51
3.4.4.	Fish Friendly.....	52
3.4.5.	Modularidad de equipos	52
3.4.6.	Antecedentes de la tecnología	53
3.4.7.	Beneficios locales	53
3.5.	Conclusiones del capítulo.....	54
4.	Aplicación práctica de los Criterios Hidráulicos a casos reales	56

4.1. Canal Unificado San Rafael-Los Cantos.....	56
4.1.1. Elección del Equipo Electromecánico para el aprovechamiento.....	59
4.1.2. Obras necesarias para la implantación de las turbinas	61
4.1.3. Evaluación Económica	69
4.1.4. Análisis Multivariable	74
4.2. Canal Unificado Hurtado-Ramírez-Salero	75
4.2.1. Elección de turbinas.....	77
4.2.2. Disposición para la implantación de las turbinas	78
4.2.3. Evaluación Económica	84
4.2.4. Análisis Multivariable	88
4.3. Conclusiones del capítulo.....	90
5. Comentarios y conclusiones	92
Bibliografía.....	96
Anexo A: Resumen de turbinas estudiadas	A
Anexo B: Análisis hidrológico	C
Anexo C: Flujo de caja para el Canal San Rafael – Los Cantos	D
Anexo D: Flujo de Caja para el Canal Unificado Hurtado- Ramírez Salero.....	I

1. Introducción

El desarrollo de un país, como Chile, está directamente relacionado con su matriz energética. Una red que asegure un suministro robusto produce beneficios en todos sus ámbitos, favorece el desarrollo humano, la generación de empleo, crea cambios en las personas además de permitir superar dificultades que, sin el uso de electricidad, serían tareas muy difíciles de llevar a cabo (Gho Barba J. , 2016). Por lo anterior, ser capaces de generar energía para autoconsumo y poder suplir las propias necesidades energéticas, supone un beneficio ostensible para la industria y las personas, en particular para la agricultura y los regantes.

La generación hidroeléctrica con Energías Renovables No Convencionales (ERNC) mediante el uso de tecnologías de microgeneración, se ha elevado como una buena alternativa para la generación de autoconsumo en Chile (Peikan, 2006). Existe un potencial para la generación hidroeléctrica de baja escala en canales de riego, principalmente asociado a Los Derechos de Aprovechamiento de Agua No Consuntivos (Ministerio de Energía, 2018).

El interés de la microgeneración en Chile queda de manifiesto cuando en 2016, la Subsecretaría de Energía y la Comisión Nacional de Riego (CNR) firmaron un convenio de colaboración que: “busca impulsar el desarrollo de proyectos de riego con ERNC (CNR, 2016)”. En éste, se hace especial énfasis en el desarrollo de iniciativas de microgeneración hidroeléctrica en infraestructura de riego, con el objetivo de apoyar y facilitar el uso de ERNC.

Esta disposición a impulsar el uso de ERNC, en particular la Microgeneración Hidroeléctrica, se manifiesta también a través de otras iniciativas, como la “Ley 18.450” y la “Ley de Generación Distribuida”. La primera bonifica la implantación de estas tecnologías siempre y cuando signifiquen un beneficio para el riego. La segunda permite el autoconsumo de la energía producida.

Si bien, una de las desventajas de la microgeneración es que no aporta seguridad al Sistema dada las fluctuaciones de energía que produce, es una buena alternativa cuando se considera para el autoconsumo y consumo para las mismas necesidades del riego (permite el bombeo de agua). Más aún, la microgeneración es una buena opción pensando en localidades aisladas donde, por inconveniencia económica, ninguno de los sistemas interconectados puede llegar con electricidad (Gho Barba J. , 2016).

1.1. Objetivos

General:

Desarrollar Criterios Hidráulicos y económicos que permitan orientar la selección e implantación de Tecnologías de Microgeneración Hidráulica en Obras de Infraestructura de Riego existente, fomentando la generación de micro hidroelectricidad en espacios potenciales, cuyo uso no ha sido explotado.

Específicos:

1. Identificar las tecnologías de microgeneración que actualmente se ofrecen en el mercado y compatibilizarlas con las distintas configuraciones que se presentan a lo largo de un circuito hidráulico de riego, considerando la topografía y todas las obras que en éste se encuentren, desde su bocatoma hasta la restitución al cauce principal.
2. Definir Criterios Hidráulicos que permitan orientar la elección de equipos de microgeneración en etapas tempranas de un proyecto de estas características.
3. Aplicar los Criterios Hidráulicos desarrollados en este documento a dos casos que disponen de potencial de generación, susceptible de ser aprovechado; estos casos son Canal Unificado San Rafael-Los Cantos en Los Andes y Canal Unificado Hurtado-Ramírez-Salero en la comuna de San Esteban.

1.2. Metodología

Para desarrollar este trabajo, se contempla ejecutar las siguientes actividades:

1. Realizar una revisión bibliográfica donde se estudia la infraestructura asociada a las obras de riego y a los equipos de microgeneración, para ejecutar un catastro de la actual oferta de proveedores de estas tecnologías y sus productos, incluyendo características, aplicaciones tipo, ventajas y desventajas de cada una.
2. Identificar la compatibilidad de las tecnologías estudiadas con las diferentes obras de infraestructura de riego, abarcando la totalidad del circuito hidráulico desde la captación hasta la entrega de los canales.

3. Desarrollar criterios hidráulicos, técnicos y económicos que permitan determinar, en cada caso, la forma típica de instalación y las modificaciones necesarias para la implantación de la tecnología seleccionada en función de sus características específicas, requerimientos técnicos y del impacto que puedan tener en la infraestructura existente. Se consideran también los criterios aportados por la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) en cuanto a metodología de estudio y diseño.
4. Aplicar los criterios establecidos a dos casos (Canal Unificado San Rafael - Los Cantos en y Canal Unificado Hurtado-Ramírez-Saleros, los dos ubicados en comuna de Los Andes, región de Valparaíso) que poseen potencial de microgeneración y que actualmente no esté siendo aprovechado, categorizando posteriormente las alternativas más atractivas de implementar en cada caso.

1.3. Alcances

La elaboración de este documento se hace con la consigna de fomentar la implantación de Tecnologías de Microgeneración Hidroeléctrica en Infraestructuras de Riego, con la idea de poder acoger estos proyectos a la “Ley de Generación Distribuida”.

La Ley permite a los usuarios que posean equipos de generación eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales, cuya potencia nominal sea menor a 300 [kW] a producir energía para autoconsumo y sus remanentes puedan ser inyectados al Sistema Interconectado, para ser descontados en otro momento.

Si bien, la categorización de proyectos hidroeléctricos por potencia instalada (Tabla 1-1), establece que las microcentrales son aquellas cuya capacidad de producción está entre 1 y 100 [kW], esta guía considera Microgeneración los proyectos con potencia instalada hasta 300 [kW], más aún, este documento puede utilizarse incluso para la Minigeneración. Esto supone que los instrumentos para incentivar este tipo de proyectos puedan ampliarse hasta este límite, permitiendo hacerlos más atractivos, desde el punto de vista de la rentabilidad para aprovechar el potencial de la infraestructura de riego.

Tabla 1-1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas de acuerdo con su potencia instalada (Gho Barba J. , 2015)

Nombre	Potencia	Aplicaciones
Gran central	>10 MW	Sistema a gran escala para conexión a red
Pequeña central	1 MW a 10 MW	Para una pequeña ciudad y comunidades, además de conexión a la red
Minicentral	100kW a 1MW	Comunidades rurales con un total entre 100 y 1500 viviendas
Microcentral	1kW a 100 kW	Una o varias pequeñas comunidades localizadas en un radio no mayor a 10 Km
Nanocentral	<1kW	Unas cuantas viviendas con necesidades escasas de electricidad

2. Revisión Bibliográfica

Con respecto a la Microgeneración Hidroeléctrica asociada a Infraestructura de Riego, se hace necesario conocer algunos tópicos previamente, estos se tratan en este capítulo en donde se muestran aspectos y conceptos fundamentales de la generación hidroeléctrica, en particular la microgeneración y los alcances de este trabajo. Asociado a las trascendencias de éste, se muestra el potencial de la microgeneración en Chile. Así mismo se revisan las leyes 18.450 y 21.118 conocida esta última como: “Ley de Generación distribuida”, la que impulsa el interés por el estudio de estas tecnologías.

Así mismo, se muestran algunos aspectos administrativos por considerar para la implantación de estas tecnologías, necesarios en fases tempranas de la vida del Proyecto. En esta misma sección se señalan algunos antecedentes necesarios para la evaluación de proyectos de estas características. Los datos que en esta sección se muestran se encuentran disponibles en los manuales y guías de procedimiento difundidos por los organismos competentes, como lo son la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), la Comisión Nacional de Riego (CNR), entre otros organismos.

Este capítulo finaliza con la revisión bibliográfica de 11 equipos de Microgeneración, en la cual se incluyen características, curvas de eficiencia y aspectos relevantes de cada uno.

2.1. Aspectos fundamentales de la Generación Hidroeléctrica

La hidroelectricidad es la fuente de energía renovable más utilizada en el mundo, un 71% de la generación de energía renovable durante el 2016. A ese año se contaba con una capacidad instalada de 1.064 [GW], lo que significa que la generación hidroeléctrica producía un 16,4% del total de electricidad en el mundo (WEC, 2016).

La energía hidroeléctrica se basa en el principio de conservación de la energía (Figura 2-1), esto consiste en el principio básico que: si el agua se puede canalizar de un desnivel superior a uno inferior, la energía potencial resultante se puede utilizar. Si se permite que esta caída haga girar un componente mecánico, ese movimiento implica la conversión de energía potencial del agua en energía mecánica. Las turbinas hidráulicas convierten la presión del agua en una potencia mecánica transmitida a través de un eje que impulsa un generador produciéndose energía eléctrica. Durante

todos los procesos de la transformación de energía descrita, se generan pérdidas, consecuencia de esto, es que la energía potencial de un principio sea mayor a la energía eléctrica producida por el generador.

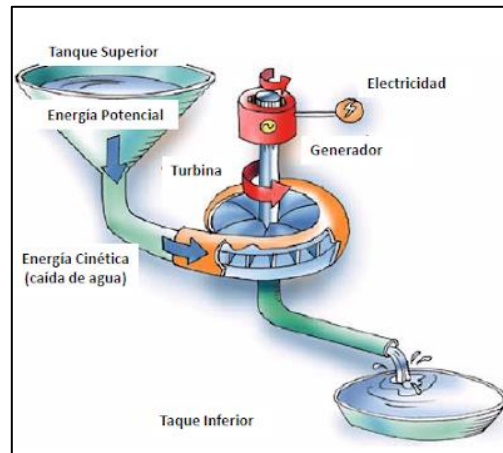


Figura 2-1 Esquema del principio de conservación de energía para la generación de hidroeléctrica (Agudelo, 2019)

2.1.1. Potencia instalada y Energía producida

La capacidad instalada define el tamaño de las obras hidráulicas asociadas a la central, una central de mayor potencia necesita obras más robustas que una de menor factor, la Fórmula (I), se utiliza para determinar la potencia instalada de una central. Como se puede ver, ésta tiene dos parámetros variables: caudal y altura neta. El caudal es una variable que queda condicionada por el régimen del canal que provee sus aguas para la generación, mientras que la altura bruta queda supeditada a las condiciones topográficas.

$$P = \eta \rho g Q H_n \quad (I)$$

Donde:

P: Potencia instalada[W]

η : Eficiencia [-]

ρ : Densidad del agua [Kg/m³]

g: Aceleración de gravedad [m/s²]

Q: Caudal [m³/s]

H_n: Altura neta [m]

La altura bruta (H_b) corresponde a la diferencia de cotas producidas entre la toma del agua y su posterior restitución, aguas abajo de la central. Un cálculo más refinado de la potencia instalada viene dado al considerar la altura neta (H_n) correspondiente a la altura bruta menos las pérdidas de carga. Esta situación queda representada a través de la Figura 2-2.

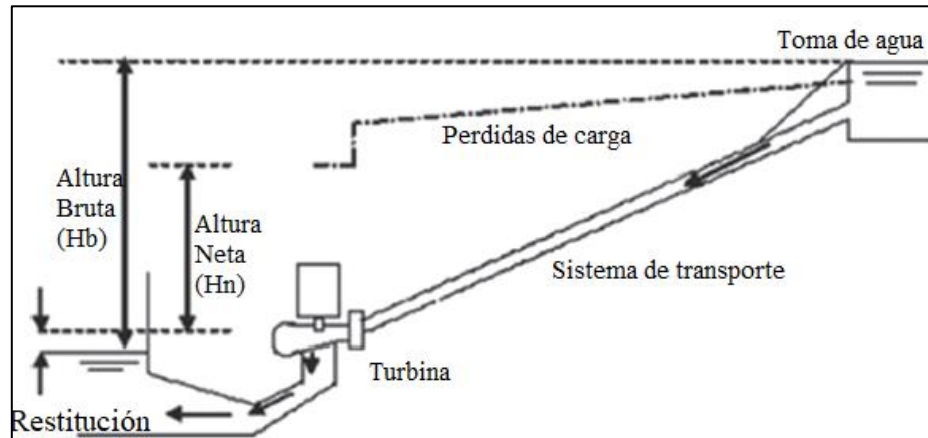


Figura 2-2: Esquema de los componentes de un pequeño aprovechamiento hidroeléctrico (Nazari-Heris, 2016)

Las pérdidas de carga se clasifican en dos tipos: longitudinales y singulares. Las longitudinales se producen por la fricción entre el material de la conducción y el agua. Las singulares, en tanto, son las pérdidas producto de particularidades en el tramo de conducción; angostamientos, ensanchamientos, rejillas, u otros.

La eficiencia de generación (Fórmula II) es una variable que contempla las pérdidas de energía producidas en la turbina, la conversión de energía producida en el generador y los equipos eléctricos utilizados hasta el punto de inyección de la corriente eléctrica; nos referimos entonces a una variable intrínseca del equipo electromecánico, esto se ve reflejado en que cada equipo y fabricante tendrá su propio factor de eficiencia producto de los elementos que ellos utilizan. Los equipos de generación: turbina y generador tienen una eficiencia (η) comprendida en el rango de valores 0,6 y 0,8.

$$\eta = \eta_t \eta_g \quad (\text{II})$$

Donde:

- η_t : Eficiencia de la Turbina [-]
- η_g : Eficiencia del Generador e inversor

Otro indicador importante es el Factor de Planta (Fórmula III), éste relaciona la energía real generada por la central eléctrica durante un año y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante el mismo tiempo (Fórmula IV), dicho de otra manera, el factor de planta es un indicador de la capacidad de la generación en el tiempo. Valores típicos para este indicador se encuentran comprendidos entre 0,4 y 0,5 para centrales de pasada (CNR, 2005)

$$Fp = \frac{E_{anual}}{E_{instalada}} \quad (III)$$

$$E = P \cdot \Delta T \quad (IV)$$

Donde:

E: Energía [kW/h]

P: Potencia [kW]

ΔT : tiempo [h]

2.1.2. Clasificación de las plantas de generación hidroeléctrica

Múltiples son las maneras que se pueden dar para un aprovechamiento hidroeléctrico. Es importante conocer y comprender los diferentes tipos de configuraciones que se pueden desarrollar con el propósito de discernir entre los beneficios que ofrece uno u otro tipo de disposición.

Es así como, por ejemplo, si se quiere mantener sin alteraciones el régimen natural del canal (esencial en el caso del riego), la única alternativa posible es una central de pasada, ahora bien, si se tiene la oportunidad de almacenar agua y liberarla en otro momento, un desarrollo de almacenamiento con embalse es la mejor alternativa. En todo caso, la elección de uno u otro tipo de aprovechamiento va asociado a las necesidades y requerimientos propios del mandante. A continuación, se muestra esta clasificación y una breve descripción

- **Centrales de pasada:** Esta configuración utiliza el flujo natural del río con muy poca alteración de la corriente del canal. Se puede producir, o no, un pequeño embalsamiento de las aguas a través de la implantación de una obra frontal al canal principal. Esto permite concentrar agua y elevar la cota aguas arriba de esta obra. Una compuerta de admisión deriva las aguas del canal principal a la turbina.

- **Centrales de embalse:** Una extensa obra, llamada embalse, aguas arriba de la planta de generación permite cambiar el flujo natural del río, almacenando agua durante los períodos de alto flujo para aumentar el agua disponible durante los periodos de bajo caudal, abasteciendo así la demanda de energía de manera más eficiente.
- **Desarrollo de almacenamientos por bombeo (reversibles):** En estos desarrollos, el agua se bombea desde un depósito inferior a uno superior utilizando energía más barata (períodos de baja demanda energética). Luego en períodos de alta demanda energética, el agua baja hasta las turbinas para producir energía que satisface las demandas máximas.

En la Figura 2-3 se puede observar el bosquejo de una instalación típica de una minicentral implantada en un canal de riego, en ella se pueden advertir las obras que generalmente configuran el aprovechamiento. Se puede observar que esta corresponde a una central de pasada, puesto que en estos casos se debe considerar que los canales de riego deben satisfacer las necesidades de irrigación por sobre las necesidades de generación.

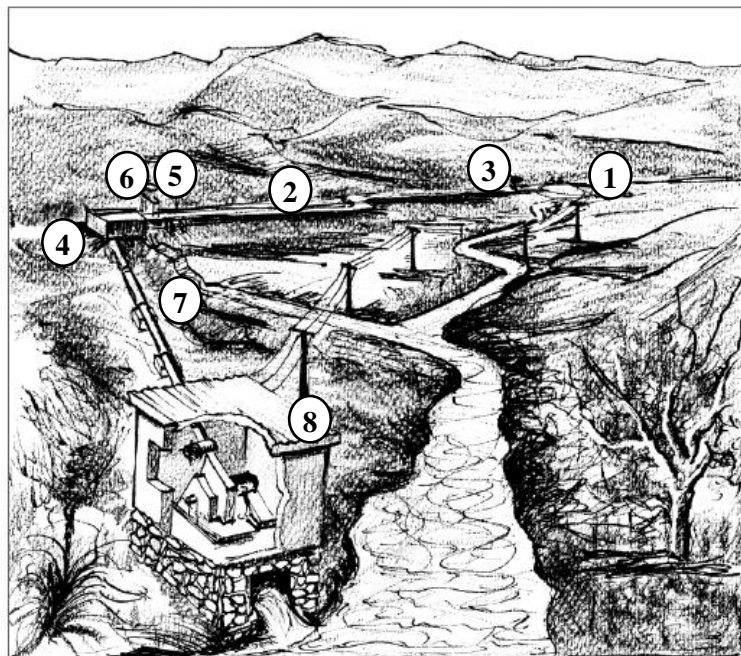


Figura 2-3: Esquema de una minicentral en un canal de riego (CNR, 2005)

En la Figura 2-3, se tiene que las obras identificadas con números son:

1. Obra de toma en canal
2. Canal
3. Compuerta de seguridad del canal
4. Cámara de carga y desarenador
5. Rápido de descarga
6. Compuerta de seguridad
7. Tubería en presión
8. Casa de máquinas

2.1.3. Potencial de la Micro Generación Hidroeléctrica, ventajas y desventajas

A gran escala la Generación Hidroeléctrica, a pesar de ser una de las más usadas en el mundo, tiene un campo de expansión limitado, puesto que en los países más desarrollados la mayoría de los ríos importantes ya cuentan con una o varias centrales, y en los países en vías de desarrollo los grandes proyectos pueden chocar con obstáculos de carácter financiero, ambiental y social (Peikan, 2006). Este es el caso de Chile donde proyectos emblemáticos se han encontrado con dificultades para su ejecución (por ejemplo: HidroAysén, Alto Maipo y Central San Pedro), como también para su operación (Central Rucatayo).

A menor escala, sin embargo, la generación de electricidad con mini y micro centrales hidroeléctricas sí ofrece posibilidades de crecimiento debido a la diversidad de caudales que aún son susceptibles de ser aprovechados con las nuevas tecnologías.

En aspectos ambientales estas centrales son una muy buena alternativa pues según el estudio “*Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica, Análisis de Ciclo de Vida de ocho tecnologías de generación*” del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España (2017), los sistemas energéticos que producen menores impactos sobre el medio ambiente son las mini y micro centrales hidroeléctricas, las ventajas de este tipo de centrales es que no necesitan inundar grandes áreas para retener agua o elevar el nivel de ésta. Por otro lado, al ser centrales de tamaño pequeño no producen mayores alteraciones en los canales.

Otro aspecto necesario para considerar es que la generación hidroeléctrica, en relación con la generación térmica (con combustibles tradicionales y nucleares), posee grandes beneficios, pues es una fuente de energía limpia y renovable que no produce desechos tóxicos, nocivos para el medio

ambiente (Harambour, 2003). Al ser una fuente renovable, la generación hidroeléctrica da la posibilidad de darle un segundo uso al recurso, ya sea destinándola para el consumo, utilizarla nuevamente en la generación o destinarla al riego.

El papel de las microcentrales hidroeléctricas puede ser muy importante en el ámbito del riego agrícola; existen tareas en esta actividad económica que requiere la utilización de energía para poder ser consumadas (por ejemplo, la impulsión mecánica de agua para riego mediante bombas), por lo mismo, ser capaces de autoabastecerse de energía con la utilización de recursos propios supone un beneficio palpable. Otro beneficio supone producir energía eléctrica en lugares donde el abastecimiento mediante sistemas convencionales de tendidos eléctricos es técnicamente difícil y antieconómico. En esos casos, una minicentral con un sistema eléctrico de distribución local puede tener grandes ventajas. En la Tabla 2-1 y la Tabla 2-2 se muestran las ventajas y desventajas de esta tecnología.

Tabla 2-1: Ventajas de las tecnologías de microgeneración (CNR, 2005)

Ventajas
Se trata de tecnologías simples, ampliamente probadas, las cuales están disponibles y solo requiere adaptaciones a las condiciones particulares de cada caso.
Es un sistema que hace factible suministrar energía eléctrica a zonas aisladas.
En general, el impacto ambiental es limitado.
La fuente de agua puede usarse en conjunto con otros usos tales como, agua para riego o uso industrial.
Su operación y mantención no requiere de trabajos muy especializados, siendo su costo bajo en comparación con otros sistemas alternativos.

Tabla 2-2: Desventajas de las tecnologías de microgeneración (CNR, 2005)

Desventajas
La inversión inicial, por kW, puede ser alta, lo que dificulta la materialización de los proyectos de regadío.
Pueden presentarse problemas operativos y del tipo legal, que dificulten el uso de las aguas cuando están destinadas a otros usos.

2.2. Fomento de Micro Hidroelectricidad en Chile

El generar ERNC mediante el uso de Tecnologías de Microgeneración Hidroeléctrica, se ha elevado como una buena alternativa para la producción de autoconsumo en Chile (Peikan, 2006). Existe un potencial para la generación hidroeléctrica de baja escala en canales de riego, principalmente asociado a los Derechos de Aprovechamiento de Agua No Consuntivos (DAANC). De acuerdo con el estudio de cuencas del Ministerio de Energía, en Chile existe un potencial hidroeléctrico de 15.938 [MW] por aprovechar.

La importancia de la microgeneración en Chile queda de manifiesto cuando en 2015 la Subsecretaría de Energía y la Comisión Nacional de Riego (CNR) firmaron un convenio de colaboración que: “busca impulsar el desarrollo de proyectos de riego con ERNC”. El que se hace especial énfasis en el desarrollo de iniciativas de microgeneración hidroeléctrica en infraestructura de riego, con el objetivo de facilitar el uso de ERNC.

Hacia el año 2016 en Chile existían 71 proyectos de microgeneración en fase de operación, construcción o licitación ubicadas principalmente desde la región del Maule hacia el sur (Gho Barba J. , 2016) lo que hace notar un incipiente ingreso de esta tecnología, apoyado por las legislaciones locales como son la Ley 18.450, la ley General de Servicios eléctricos y la Hoja de Ruta 2050 elaborado por el Ministerio de Energía, en esta última se establece que a ese año Chile debe contar con una matriz energética de un 70% de ERNC.

2.2.1. Ley General de Servicios Eléctricos

A propósito del creciente interés en nuestro País por el uso de tecnologías limpias y la constante búsqueda del sector público y privado por implementar nuevas fuentes de energía, entra en operación en 2014 la Ley 20.571 de Generación Ciudadana y su posterior modificación en 2017, la Ley 21.118. Ésta normativa brinda el derecho a los clientes de las empresas distribuidoras a producir su propia energía con el objetivo de impulsar la utilización de Energías Renovables no Convencionales en Chile. Los requisitos para acogerse a este mandato son: Poseer un equipo de generación con una potencia de inyección menor a 100 [kW] y que la generación se produzca a partir de ERNC.

En 2017 se hicieron algunas modificaciones al mandato, éste se reemplaza por la Ley 21.118 que entrega mayores garantías a los consumidores. El oficio regula el funcionamiento de equipos de generación eléctrica que producen en base a ERNC para el autoconsumo de clientes regulados (hogares e industrias), presentando un derecho para todos los dueños de estos equipos de inyectar energía a la red de la distribuidora eléctrica.

En efecto, la nueva Ley admite tener proyectos de generación con ERNC que no superen los 300 [kW] de potencia nominal¹, la energía producida debe ser utilizada solo para autoconsumo, mientras que el remanente (diferencia entre la producción y consumo de energía) de ser inyectado al Sistema no recibe retribución. Dicho en otras palabras, el mandato permite traspasar los excedentes de la generación de un cliente, que no hayan podido ser descontados, a otras cuentas de suministro de electricidad en inmuebles de propiedad del mismo usuario. Suprimiendo la exigencia de la Ley 20.571 que obligaba a la empresa distribuidora a pagar por los excedentes.

En resumen: La Ley 21.118 da el derecho para que quienes dispongan de un equipo de generación menor a 300 [KW] puedan utilizar la energía producida por éstos para autoconsumo en el punto de inyección. Además, permite que los excedentes de un año sean utilizados en otro momento dentro del mismo período. Otra ventaja que brinda esta Ley es la facultad de permitir al titular que los excedentes puedan ser descontados de otra cuenta de luz, siempre y cuando, dicha cuenta sea del mismo titular que realiza la inyección.

2.2.2. Proyectos de riego con fuentes de energías renovables no convencionales (Ley 18.450)

La Ley 18.450 de Subsidio a Obras de Riego y Drenaje, a cargo de la Comisión Nacional de Riego (CNR), implementada con el propósito de bonificar el costo de estudios, construcción y rehabilitación de obras de riego o drenaje, ha ampliado su cobertura mediante el llamado a concursos especiales con el propósito de fomentar las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), cuya producción sea destinada al autoconsumo o para su utilización en la demanda eléctrica de equipos de riego mecánicos.

¹ Potencia nominal: Potencia que se presenta en el punto de inyección con los inversores

La referida ley, bonifica el costo de estudios, construcción y rehabilitación de obras de riego o drenaje y las inversiones de equipos y elementos de riego mecánico o de generación, siempre que se ejecuten para incrementar el área de riego, mejorar el abastecimiento de agua en superficies regadas de forma deficitaria, mejorar la calidad y la eficiencia de la aplicación del agua de riego o habilitar suelos agrícolas de mal drenaje (Gho Barba J. , 2015)

Este mandato financia con un máximo de UF 12.000 para proyectos presentados por personas individuales y UF 24.000 para el caso de Organizaciones de Usuarios constituidas o en proceso de constitución.

Para más detalles acerca de la presentación de proyectos, la CNR en conjunto con el Ministerio de Energía han dispuesto un Informe llamado: “*MANUAL PARA LA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE RIEGO CON FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES- MICROHIDRO, A LOS CONCURSOS DE LA LEY N°18.450*” escrito por Javier S, Gho Barba en 2015.

2.3. Aspectos técnicos y administrativos por considerar para la instalación de una Microcentral

A propósito de los criterios técnicos y aspectos administrativos por considerar para la instalación de una Microcentral, se debe tener siempre presente que cada proyecto tiene características individuales asociadas al tamaño y la ubicación del mismo. Sin pérdida de generalidad, se presentan a continuación algunos elementos comunes que se deben tener presente en todos los proyectos durante su etapa de preinversión².

Este trabajo está centrado en fases tempranas de la ingeniería, más precisamente a orientar la elección del equipo electromecánico en etapas de factibilidad. Esta etapa finaliza con la toma de decisión respecto al futuro del Proyecto.

² Preinversión: Fase del Ciclo de vida en la que los proyectos son estudiados y analizados con el objetivo de obtener la información necesaria para la toma de decisiones de inversión

2.3.1. Antecedentes básicos

Los antecedentes básicos corresponden a la información que se debe conocer al momento de estudiar el verdadero potencial del aprovechamiento hidroeléctrico disponible, para esto se necesita la siguiente información:

- a. **Topografía:** El lugar de emplazamiento donde se proyecta la construcción de la microcentral debe ser caracterizada a través de un estudio topográfico, siendo uno de los objetivos más importantes de éste el establecer la diferencia de nivel existente entre los posibles puntos de captación y restitución de las aguas del proyecto. Así como también el área que será impactada con el mismo y un reconocimiento general de accidentes geográficos, como fuertes pendientes, saltos, líneas de transmisión cercanas, entre otros.
- b. **Hidrología:** Corresponde a la cuantificación de los recursos hídricos disponibles para el aprovechamiento hidroeléctrico. Es necesario precisar de registros históricos u otra forma que permitan caracterizar el cauce en estudio, con el fin de determinar el régimen de caudales aprovechables por la generación, además permita diseñar las obras hidráulicas.
- c. **Geología, geotecnia y mecánica de suelos:** La información de este tipo va dirigida a proporcionar el conocimiento de las características del terreno que soportará las estructuras del Proyecto y la pertinencia de los suelos para la instalación de los equipos electromecánicos y la maquinaria de construcción.
- d. **Medio ambiente y ecología:** A pesar de ser uno de los medios de producción de energía que menor impacto ambiental genera, es necesario considerar esta variable, y si la instalación y operación de un proyecto implicaría con alteraciones al ecosistema.
- e. **Evaluación del requerimiento eléctrico:** A pesar de tener las condiciones topográficas, hidrológicas y contar con buenos suelos para la instalación de obras hidráulicas se debe tener en cuenta que los beneficios de la Ley 21.118 se pueden ejercer siempre y cuando la energía generada pueda ser autoconsumida. Una evaluación de estas características permitirá compatibilizar el consumo con la generación bajo los estándares que la ley permite.

2.3.2. Aspectos administrativos y normativos por considerar para la instalación de una microcentral

Existen tópicos que se deben considerar al momento de plantearse la posibilidad de instalar una microcentral, estos aspectos van en su mayoría, asociados a las etapas de factibilidad de los proyectos, cuando se decide el futuro próspero o no de los mismos. Por lo general, estos trámites administrativos son comunes para el proyecto, sea cual sea la turbina elegida, es decir, no interfieren en la elección del equipo, aun así, se deben considerar.

La legislación actualmente vigente en Chile señala que para poder iniciar la construcción de una microcentral, es requisito previo poseer el “Derecho de Aprovechamiento de las Aguas” que se van a utilizar, así como también el derecho de construcción de las obras hidráulicas, este último otorgado por la Dirección General de Aguas.

A continuación, se presentan algunos requisitos necesarios, esta información es referencial al momento de hacer este documento, pero se debe considerar siempre la información más completa y actualizada disponible.

a. Derechos de aprovechamiento de aguas (DAA).

El derecho de aprovechamiento de aguas es un antecedente determinante en un Proyecto Hidroeléctrico, pues limita la generación de electricidad y el diseño de las obras. En este caso la captación queda condicionada por la suma de los derechos no consuntivos que disponga el o los regantes, sean estos de carácter permanentes o eventuales.

Una situación común de encontrar al momento de estudiar la factibilidad de instalar una Microcentral de Generación Hidroeléctrica en Infraestructura de Riego es que los DAA ya estén en poder del regante, quien es el interesado en llevar a cabo el Proyecto.

Para ser aprovechados con fines de generación los DAA deben estar registrados en el Catastro Público de Aguas, en este catastro se indican las características esenciales de cada derecho, por ejemplo: Los caudales se presentan en medida volumétrica por unidad de tiempo (m^3/s , l/s u otra forma análoga), en caso contrario los derechos de agua deben ser perfeccionados por el titular, y así mismo se debe aclarar si el DAA es individual o colectivo y si éste puede ser utilizado con fines no consuntivos en la generación hidroeléctrica de la central.

En caso de no poseer los DAA, los trámites legales deben partir con la solicitud del derecho, la que se debe hacer atendiéndose a lo indicado en la: “*GUÍA PARA LA PRESENTACIÓN DE SOLICITUDES DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTOS DE AGUAS SUPERFICIALES*”, disponible en la página web de la Dirección general de aguas.

b. Análisis del derecho del desarrollador sobre el terreno

Ante la iniciación de un Proyecto es preciso establecer claramente las facultades que posee el desarrollador respecto del terreno sobre el cual se quiere emplazar el mismo. Para ellos se debe determinar en qué condiciones se hará uso del terreno; los títulos más comunes son:

- Propiedad: Es el derecho que tiene el “dueño” del terreno, aquel al que pertenece. Con este derecho se le faculta para realizar todas las actividades que estime conveniente.
- Arriendo: Contrato mediante el cual, por medio del pago de un precio, se faculta al arrendatario a usar y gozar del bien según lo convenido en el contrato.
- Servidumbre: Es un derecho que se otorga a un tercero sobre un bien inmueble y que limita el libre uso del bien por parte de su dueño a favor de la otra persona.

Al igual que los derechos de aprovechamiento, una situación común de encontrar es que el desarrollador del proyecto sea el propietario del terreno donde se proyecta la implantación de la planta. Sin embargo, se pueden producir casos donde se necesite considerar los títulos ya descritos.

c. Permisos Ambientales y autorización de construcción de obras.

Se debe tener presente que, en caso de modificación de cauces que conduzcan un caudal mayor a 2 [m³/s], consideradas obras mayores para la DGA según el Artículo 294, o que las intervenciones planificadas afecten área bajo protección ambiental, los proyectos deben contar con una Resolución de Calificación Ambiental favorable, según lo estipulado por la normativa vigente.

La información acá entregada tiene por objetivo guiar a quien posee el incipiente interés de implantar una Microcentral dentro de un Canal de Riego. En cualquier caso, se deben hacer las averiguaciones pertinentes, con los procedimientos más actualizados, respecto a la manera de actuar para obtener los permisos correspondientes, las particularidades deben ser analizadas caso a caso.

Los permisos y derechos necesarios para la constitución de un aprovechamiento hidroeléctrico son, en la práctica, equivalentes para cualquier tipo de equipo electromecánico de generación, es decir, los análisis descritos en esta sección se deben realizar aún cuando no se tenga claridad del activo a utilizar, por lo mismo no intervienen en la toma de decisión sobre la turbina. Sin embargo, son estudios relevantes que determinan el futuro próspero o no del Proyecto en general.

2.4. Catastro de turbinas utilizadas para la generación hidroeléctrica

En cuanto a la generación hidroeléctrica se refiere, es habitual pensar en tres tipos de turbinas ampliamente conocidas estas son; Turbinas Francis, Kaplan y Pelton. Cada una con sus características propias, que la hace a una mejor alternativa respecto a la otra para distintas combinaciones de caída y caudal, haciendo la elección de una de éstas una tarea sencilla. A nivel de grandes centrales estas son las únicas tres alternativas existentes en el mundo y a ello deben su fama.

Sin embargo, cuando escalamos la generación hidroeléctrica convencional a la mini y micro generación, la elección del tipo de equipo electromecánico deja de ser tan sencillo, ya que el espectro de turbinas que ofrece el mercado aumenta significativamente. Existen más de 20 equipos distintos en todo el mundo (Loots, 2015) . Esta sección trata algunos de los tipos de equipos que ofrece el mercado, las condiciones bajo las cuales éste funciona, su curva de generación, sus requerimientos técnicos, su forma típica de instalación, entre otras características que las hace diferenciable al resto de los equipos.

En general, las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos, Turbinas de Acción y Turbinas de Reacción. Existe otro tipo de clasificaciones para estos equipos, por ejemplo; según la dirección en la que entra el agua al rodete. Utilizaremos la primera al ser la más esgrimida.

En las Turbinas de Acción, la incidencia del agua y el sentido del giro del rodete coincide en el punto en que se produce un choque de agua sobre los álabes. Toda la energía cinética con la que llega el agua a la turbina se utiliza en su giro. La energía de presión que el agua posee a su entrada, al ser dirigida al rodete directamente, se convierte totalmente en la energía cinética de éste. La presión del agua a la entrada y a la salida es la misma.

Por otra parte, en las Turbinas de Reacción el sentido de giro del rodete no coincide con la dirección de entrada y salida del agua. En estas, hay diferente presión a ambos lados de las ruedas de los álabes que impulsa el rotor. Mientras discurre el fluido entre los álabes móviles, disminuye su presión puesto que el espacio entre las “cucharas” es variable. En estas se produce un efecto parecido al que sustenta los aviones.

Se presenta en la Figura 2-4, un esquema donde se muestran algunas de turbinas existentes en el mercado, separadas según la clasificación anteriormente descrita. Ahora, se debe considerar que dentro de cada tipo de turbina que aparece en este esquema, existen subtipos de equipos, esto para adecuarse a las necesidades de su instalación, valga como ejemplo: la turbina Kaplan que se presenta como una familia que incluye las turbinas Bulbo y Hélice.

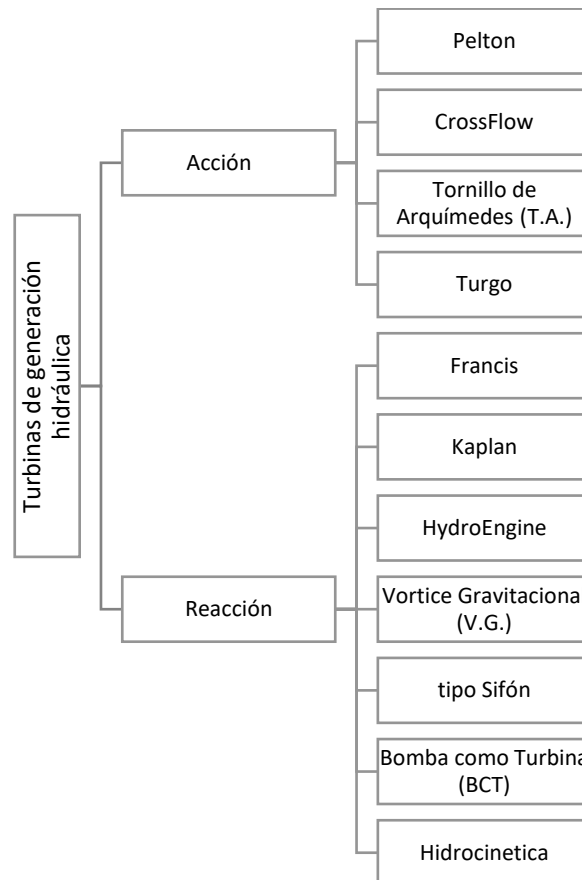


Figura 2-4: Esquema de clasificación de las turbinas hidráulicas según su reactividad

El catastro realizado se incluye en el

Anexo A.: A continuación, se describen las turbinas haciendo especial énfasis en las máquinas no convencionales, con sus características particulares, curvas de rendimiento y otros aspectos importantes. La descripción de los equipos convencionales, no se ha considerado de interés describirlos, dados los objetivos de este trabajo. Para obtener información más detallada respecto a éstos, se recomienda consultar el texto de “Introducción al Proyecto de Centrales Hidroeléctricas” (2003) Escrito por Fernando Harambour.

Del catastro citado se extrajeron las curvas características. A continuación, se presenta un gráfico (Figura 2-5) que incluye todas las mencionadas y permite realizar la comparación de estas, donde se puede observar, por ejemplo, las ventajas y desventajas de un equipo por sobre el otro cuando se trabaja con carga parcial.

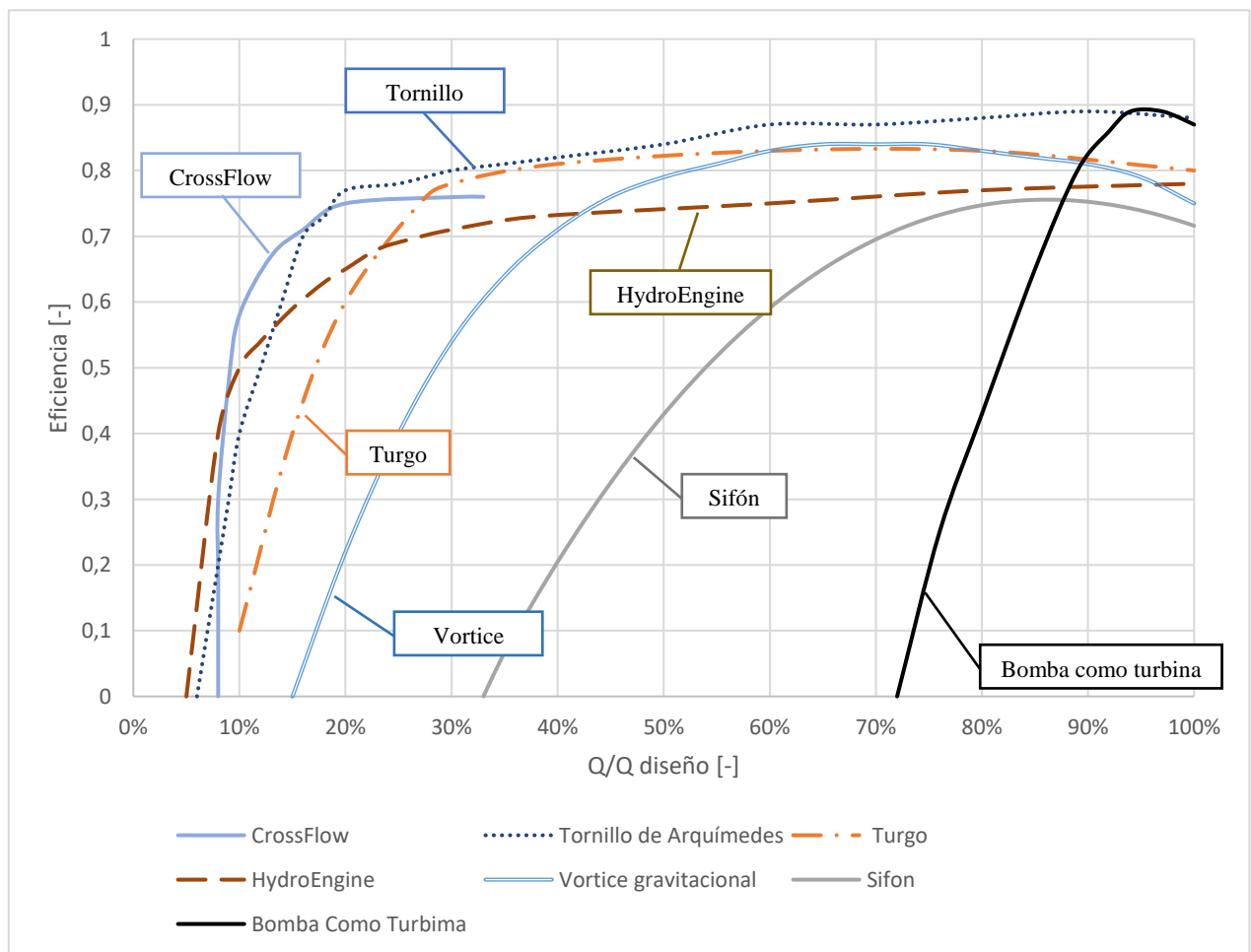


Figura 2-5 Gráfico comparativo de las curvas de eficiencia de 11 tipos distintos de turbinas para la generación hidroeléctrica

2.4.1. Turbina CrossFlow

También conocidas como turbinas de Flujo Cruzado (nombre en español), son máquinas muy utilizadas, principalmente en pequeños aprovechamientos hidroeléctricos en Chile teniendo una reputación bien ganada en nuestro País.

El flujo de agua pasa a través de una tubería de entrada hasta el inyector, el agua ingresa al corredor de la turbina donde impacta los álabes produciendo el movimiento del rotor, este impacto se produce en dos etapas, lo que también le da a esta máquina el nombre de turbina de doble efecto, el primer impacto se da cuando el flujo entra al corredor de la turbina y el segundo, justo antes de la descarga, en el lado opuesto del corredor. Se esquematiza una Turbina de Flujo cruzado en la Figura 2-6, donde se puede observar el doble efecto descrito anteriormente y los componentes del equipo componentes.

La turbina CrossFlow tiene una particularidad que la hace muy atractiva para pequeños aprovechamientos, esta máquina tiene un diseño de admisión parcial de flujo, como se esquematiza en la Figura 2-6, dicho de otra manera, este equipo puede funcionar con fracciones del largo de su rodete ($1/3$, $2/3$, o el rodete entero), así cuando la turbina está parcialmente cargada, se adapta a las circunstancias.

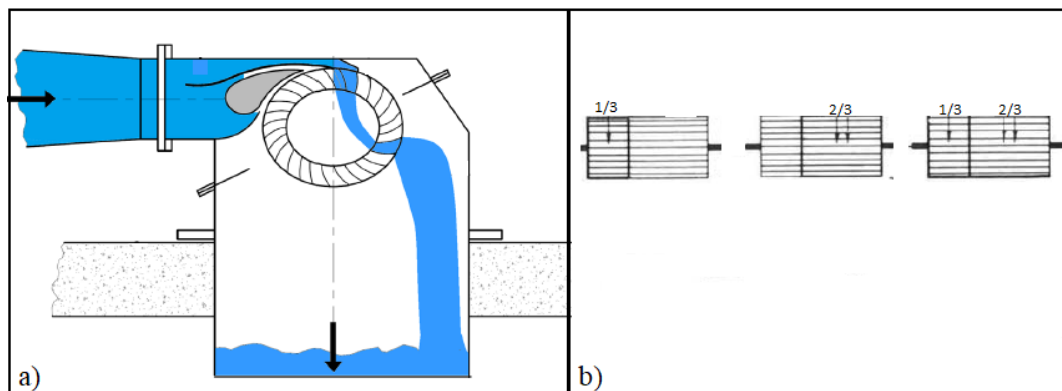


Figura 2-6 a) Esquema de una turbina CrossFlow donde se ve el doble impacto sobre los álabes, en la figura b) podemos observar el sistema de admisión parcial de flujo (Adau, 2012)

Por su puesto, la admisión parcial cumple un objetivo importante y es el de mejorar la eficiencia de la CrossFlow cuando ésta opera en bajos caudales, así, por ejemplo; cuando el caudal es 1/3 del caudal de diseño, el rodete funciona a 1/3 de su capacidad. Esto permite tener una curva de rendimiento plana como se observa en la Figura 2-7, de esta forma, la máquina es capaz de trabajar bajo un gran espectro de caudales soportando las variaciones tanto estacionales como diarias que sufre un canal de riego.

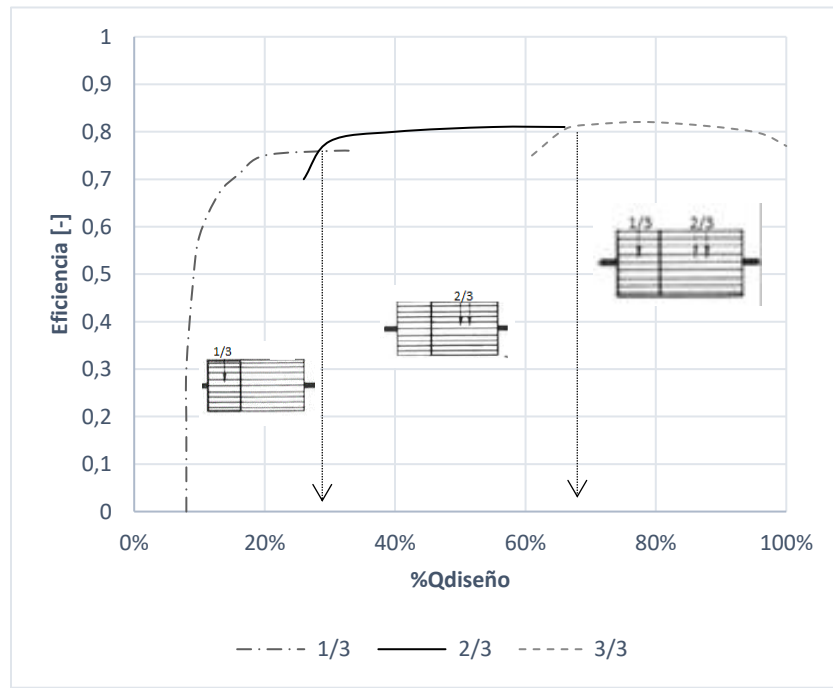


Figura 2-7: Gráfico con la curva de eficiencia para una Turbina CrossFlow; en este se puede observar como varía la curva de eficiencia según la admisión que tenga el rodete (Cinik, 2019)

La implantación de estos equipos, al igual que la turbina Pelton, requieren de una tubería en presión, la instalación de los equipos electromecánicos se debe hacer dentro de una casa de máquinas que permita resguardar los equipos electromecánicos y brinde suficiente espacio para las maniobras de mantenimiento de todos los equipos.

Estos activos se pueden utilizar en paralelo, instalación que permite aumentar la gama de caudales turbinarles por estos equipos.

Un caso de aplicación en Chile a cargo de la empresa Ossberger construida el año 2012, posee dos turbinas conectadas en paralelo, generando 1.480 [kW] c/u aprovechando una caída de 20,0 [m] y un caudal de 9 [m³/s], esta instalación se muestra en la Figura 2-8, la imagen a y junto a ésta se muestran las turbinas albergadas por una casa de máquinas.

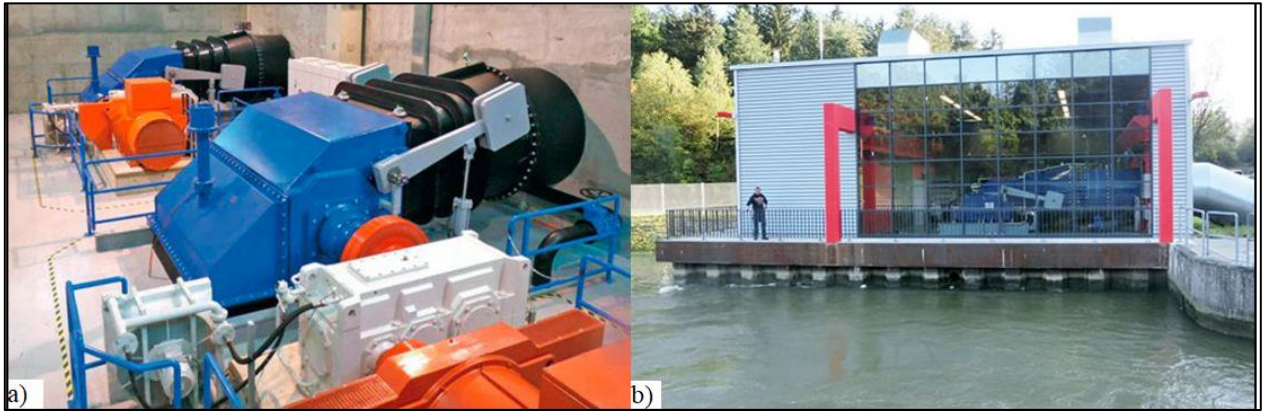


Figura 2-8: Instalación de una turbina Crossflow, en la imagen a) se puede observar un caso de aplicación de dos turbinas conectadas en paralelo en Chile y en la imagen b) se observa la Casa de Máquinas que alberga estos equipos (Ossberger, 2019)

2.4.2. Turbina Tornillo de Arquímedes

El Tornillo de Arquímedes, también llamado Tornillo Sin Fin o Tornillo Hidráulico, era utilizado en la antigüedad como bomba para elevar sólidos granulados y líquidos. Hoy en día se ha ampliado su oficio y además de este, se ha invertido su funcionamiento para hacer de esta máquina una turbina hidráulica.

Su funcionamiento consiste en hacer girar un eje helicoidal producto del peso ejercido por un volumen de agua. El Agua en el extremo superior es encerrada en la primera cavidad, ésta ejerce una presión en el álabe, haciendo rotar el eje y desplazando el agua encerrada entre los álabes hacia abajo. Esto se produce de manera continua, de modo que cada giro permite el ingreso de un nuevo volumen de líquido repitiendo el ciclo. Se muestra en la Figura 2-9 un esquema de la situación

descrita, además se puede observar en la parte superior del tornillo el generador de la turbina conectada al eje helicoidal.

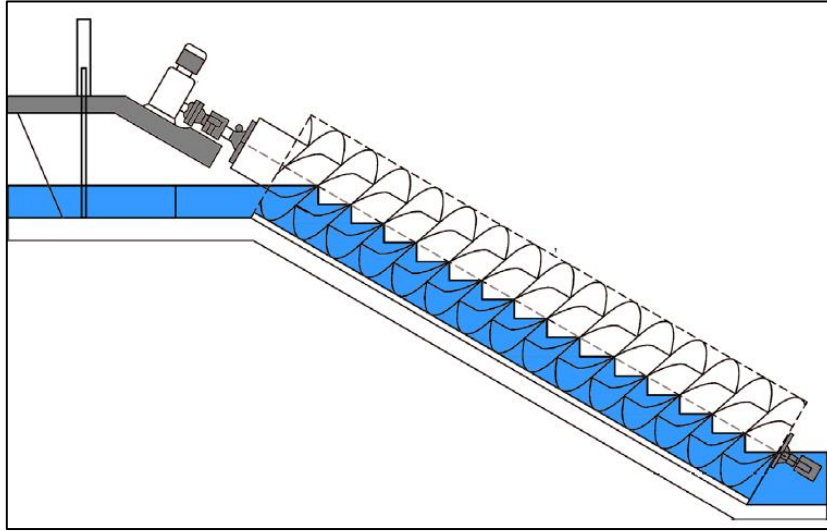


Figura 2-9 Esquema de una Tornillo de Arquímedes (Adau, 2012)

Una de las ventajas más destacables del Tornillo de Arquímedes es la capacidad de trabajar en aguas con gran contenido de gasto sólido, más aún, éste puede funcionar incluso en presencia de materiales flotantes siempre y cuando éstos quepan en la separación de las hélices. De cualquier forma, una reja gruesa antes de la entrada a la turbina asegura un funcionamiento continuo, así pues, este equipo permite el paso de peces a través de sus álabes (Fish Friendly), minimizando el impacto ambiental en canales con presencia de estos.

Esta máquina posee una curva de eficiencia plana (Figura 2-10), característica que se le atribuye a la capacidad de controlar la velocidad de giro del tornillo, minimizando las pérdidas producidas en la admisión. Puede producir con un rango de caudales comprendido entre los 0,25 y los 10 [m³/s] y caídas que van desde 1 a 10 metros (Andritz, 2012). Para ampliar el rango de funcionamiento de éste, existe la posibilidad de instalar esta turbina en paralelo (cuando el caudal es mayor) o en serie, cuando la caída está por sobre los 10 [m].

El Tornillo hidráulico requiere para su implantación escasas obras civiles, siendo necesario casi únicamente un canal de aducción capaz de albergar el eje helicoidal con sus dimensiones y el canal de aducción encargado de dirigir el agua hasta la turbina. La estructura encargada de contener la

turbina debe tener inclinaciones igual a 30° con respecto a la horizontal para mejorar el rendimiento del equipo.

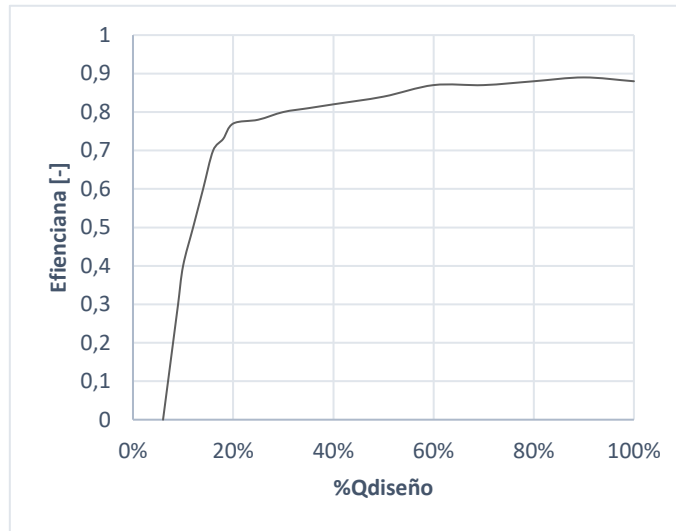


Figura 2-10 Gráfico con la curva de eficiencia para un Turbina Tornillo de Arquímedes (Andritz, 2012)

Una desventaja la necesidad de espacio para utilizar por la máquina, la cual requiere un largo aproximado de 2 veces la caída a utilizar, haciendo necesaria la intervención del cauce. Por otro lado, el diámetro del Tornillo que se relaciona directamente con el caudal del aprovechamiento tiene necesidades grandes de espacio, (Spaams Babcock, 2015), En la Figura 2-11 se muestra una instalación de esta turbina y se puede apreciar, además las dimensiones de este.

Figura 2-11: Instalación de un tornillo de Arquímedes y Un tornillo en fase de implantación (Spaams Babcock, 2015)



2.4.3. Turbina Turgo

La turbina Turgo, es similar a la turbina Pelton, pero sus álabes tienen una forma y disposición distinta. El agua es conducida hasta el inyector donde que expulsa un chorro a gran presión que incide sobre los álabes del rodete para generar el movimiento, el agua hace abandono por el extremo opuesto donde es restituida al cauce. A diferencia de las turbinas Pelton, el chorro incidente puede impactar más de una cuchara a la vez y utiliza un rodete de menor diámetro. En la imagen. Figura 2-12 se puede observar un rodete y su semejanza con la turbina Pelton.

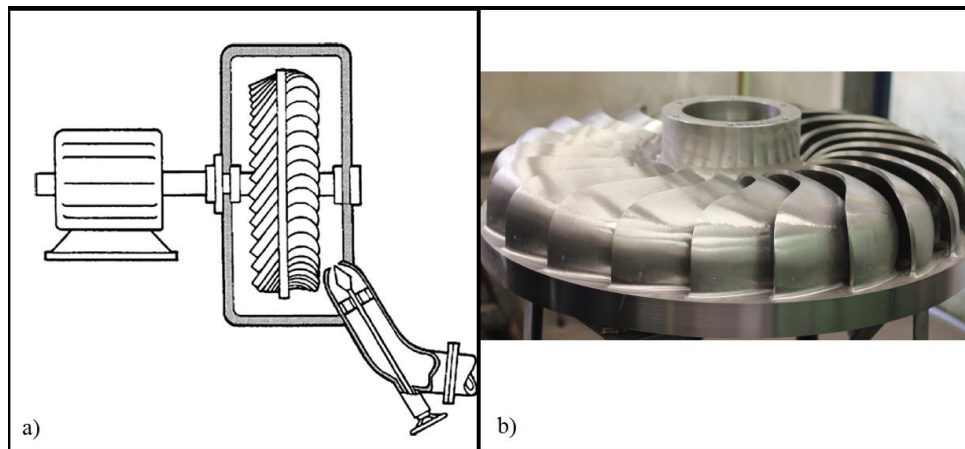


Figura 2-12: Esquema de la turbina Turgo, en la imagen (Adau, 2012)b) se puede observar las particularidades del rodete y su semejanza con el de una turbina Pelton

Un aspecto interesante por considerar es que a pesar de la similitud de este mecanismo con una Pelton, este equipo necesita un menor diámetro en el rodete, es decir, si comparamos las características de un aprovechamiento en iguales condiciones, la turbina Pelton necesita un rodete de mayor envergadura que el requerido bajo las mismas circunstancias por una Turgo. Esto significa una menor requerimiento de espacio efectivo por parte de la turbina, lo que significa una menor envergadura de las obras civiles necesarias para albergar los equipos, pero tiene implicancias en la mayor velocidad de rotación que tendrá la Turgo para el mismo aprovechamiento que una Pelton, esto significa pérdidas (de ahí su menor eficiencia) y una mayor cantidad de ruido producido.

Este equipo reporta eficiencias de generación por sobre el 0,8 (Figura 2-13), muy similar a otros equipos. Una curva característica que asciende rápidamente y luego es casi plana hace de la turbina Turgo un equipo altamente competitivo en la microgeneración hidroeléctrica. Su eficiencia es peak es menor a la de una turbina Pelton a pesar de su similitud en funcionamiento.

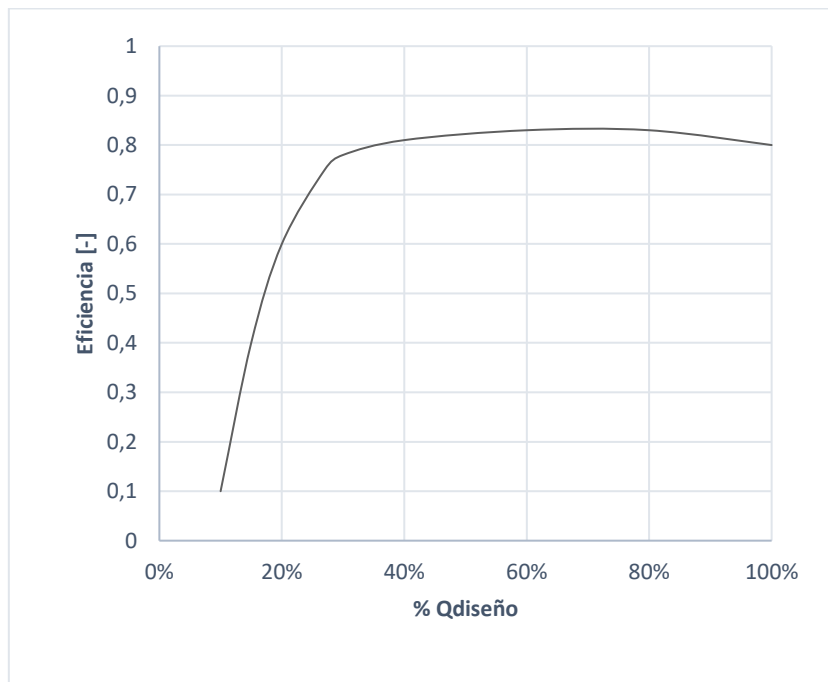


Figura 2-13: Gráfico con la curva de eficiencia para una turbina Turgo (HidroGD, 2019)

2.4.4. HydroEngine

Las Turbinas HydroEngine, son diseñadas por NatelEnergy, esta máquina se desarrolla para los aprovechamientos de baja caída (3 [m] a 20 [m]) y grandes caudales (3 [m³/s] y los 200 [m³/s]), esto se lo debe a su configuración mecánica, que le permite hacer circular cuantiosos caudales a baja altura, mientras mantiene altas velocidades en sus ejes, sin riesgo de cavitación entre sus álabes.

Esta máquina, posee flujo axial y a diferencia de los equipos convencionales se construye con dos ejes conectados a una cinta donde van acoplados los álabes, esta cinta se mueve en una trayectoria elíptica entre los ejes, accionado por el movimiento producido por el flujo de agua. El agua ingresa a la turbina a través de la conducción en presión y se dirige al primer conjunto de álabes donde los acciona por primera vez y posteriormente al segundo como se muestra en la Figura 2-14, el agua es desalojada a través de una cañería que se debe encontrar sumergida. El funcionamiento de esta es similar a una turbina de Flujo Cruzado en que el agua acciona dos veces los álabes antes de desalojar el equipo, pero se utiliza en condiciones similares a las turbinas Kaplan

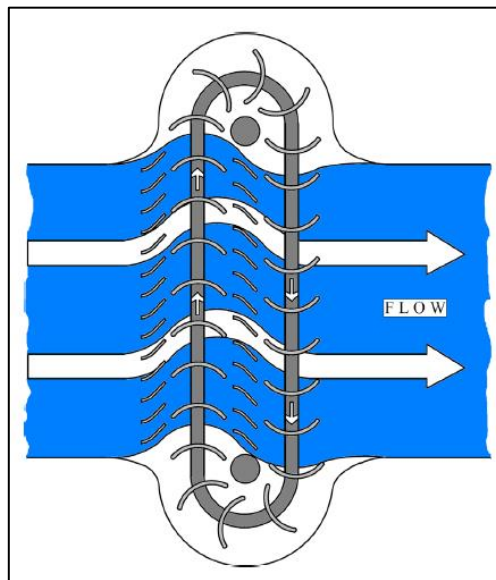


Figura 2-14: Esquema de una Turbina HydroEngine (Adau, 2012)

La capacidad de regular la velocidad de la cinta con los álabes le confiere a esta turbina una elevada eficiencia con una curva ascendente, aunque se podría considerar en muchos casos plana, debido a la capacidad de este mecanismo de regular la velocidad de rotación conforme el caudal fluyente a través de éste. Esta característica también le da la capacidad de trabajar en condiciones de bajo caudal. Su eficiencia peak reportada es 0.78 [-], esta queda representada en el gráfico de la Figura 2-15.

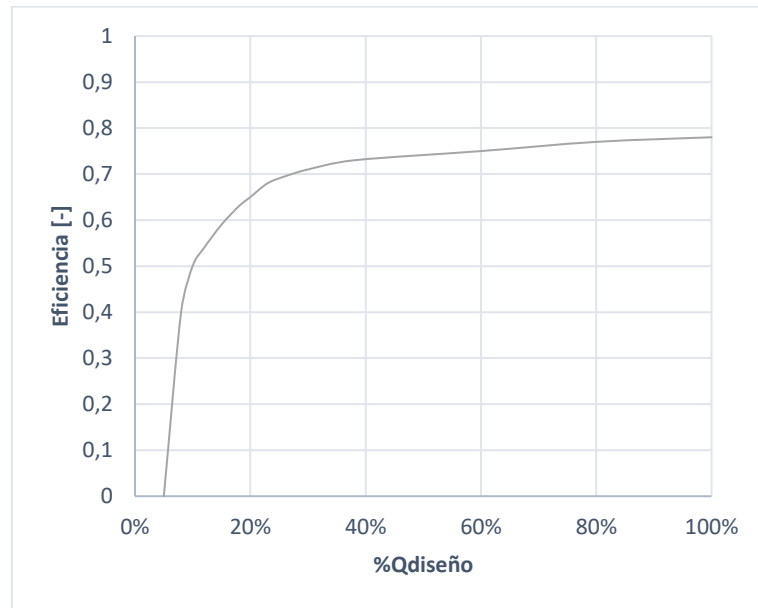


Figura 2-15: Gráfico de eficiencia para una turbina HydroEngine (RIVERS, 2014)

Estos equipos pueden integrarse a cualquier tipo de aprovechamiento hidroeléctrico de baja altura, esto incluye los canales de riego ya sea que la conducción se realice como flujo libre o en presión. Aunque son vulnerables a la presencia de material sólido en el flujo utilizado para la generación.

Estas turbinas, necesitan para su instalación menores obras que las turbinas Kaplan, ya que ésta puede ser instalada por sobre el espejo de agua con pocas probabilidades de sufrir daños por cavitación, esto minimiza los costos de obras civiles ya que se reduce la cantidad de excavación necesaria para la implantación de esta tecnología. La infraestructura va resguardada por una casa de máquinas, una instalación típica se muestra en la Figura 2-16.

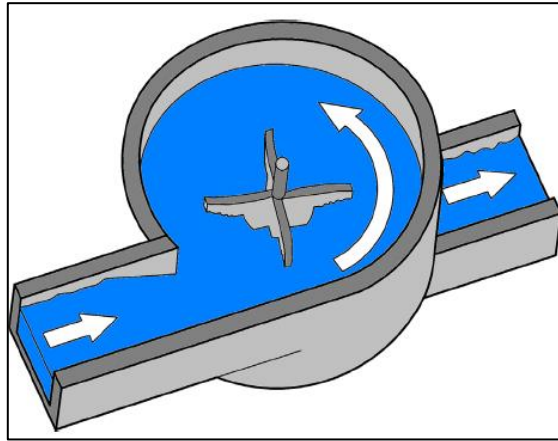


Las bajas velocidades que produce en el flujo permiten la coexistencia de este equipo con peces que vivan aguas arriba y/o aguas debajo de la instalación, pero su fabricante no asegura el paso de seres vivos a través de sus álabes producto las velocidades con las que la cinta rota para la producción de energía.

2.4.5. Turbina de Vórtice Gravitacional

La turbina de Vórtice Gravitacional (Figura 2-17) es una tecnología no convencional de microgeneración, cuyo mecanismo para transformar la energía consiste en dejar que el agua pase a través de una entrada recta y se dirija de forma tangencial a un contenedor cilíndrico que posee un drenaje de fondo. El agua forma un gran vórtice sobre este drenaje central produciendo el movimiento de la turbina que extrae la energía rotacional del vórtice, convirtiéndola en energía eléctrica.

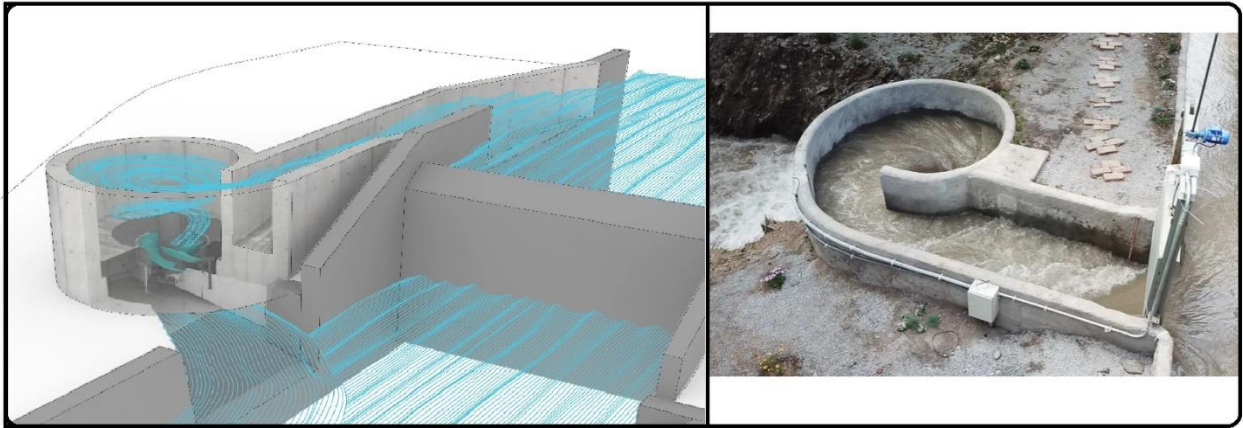
*Figura 2-17: Esquema de una turbina de Vórtice Gravitacional
(Adau, 2012)*



La turbina de Vórtice (Figura 2-18) tiene un diseño modular que permite el transporte de los equipos eléctrico y mecánico, no así el contenedor externo que corresponde a una estructura de hormigón. El generador funciona sumergido, permitiendo que el agua actúe como refrigerante de los mecanismos. Durante la operación de la Turbina, el agua que forma el vortice cubre el rodete y el generador pero, cuando se seca la turbina, sus equipos quedan expuestos a las condiciones externas.

Este mecanismo tiene la particularidad de hacer posible la instalación de más de un equipo, ya sea en serie o paralelo, adaptándose a los requerimientos del aprovechamiento, de esta manera la instalación en serie permite ampliar el rango de caída útil al instalar una turbina bajo la otra, mientras que la instalación en paralelo permite aumentar el caudal del aprovechamiento.

Además, este equipo tiene un diseño compacto que facilita su adaptación en aprovechamientos con pequeños espacios disponibles, el diámetro externo del contenedor es 4 [m], lo que se traduce en poca área requerida para su instalación.



Éste tiene una generación máxima de 55[kW], limitación dada por el generador, funciona con rangos de caídas comprendida entre 1,5 [m] y 4 [m] y caudales que van desde 1,2 [m³/s a 3 [m³/s]. Por otro lado, la curva de eficiencia de este equipo, que se muestra en la Figura 2-19 reporta un rendimiento máximo de 0.84 [-], y una curva de rendimiento que indica la necesidad de tener un flujo idealmente mayor al 50% del $Q_{\text{diseño}}$, para no comprometer el rendimiento del equipo.

Este equipo gracias a la configuración de sus álabes, los que se encuentran separados, permite el paso de peses a través de ellos, haciendo de esta turbina una buena alternativa al momento de considerar un equipo de generación hidroeléctrica que no altere la vida de las especies existentes en el canal.

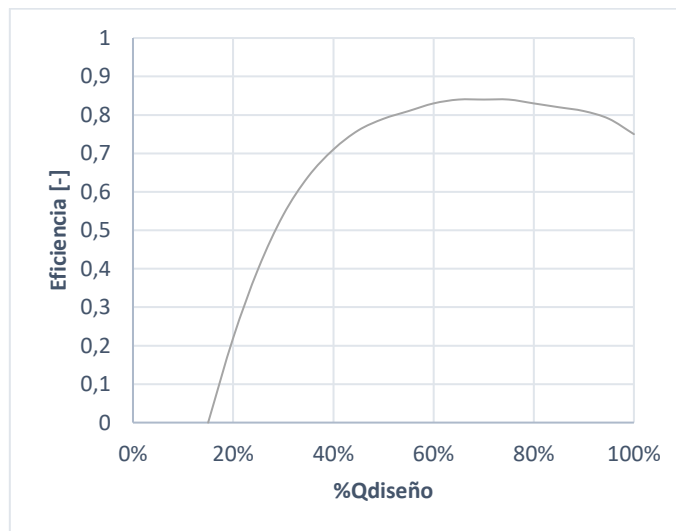
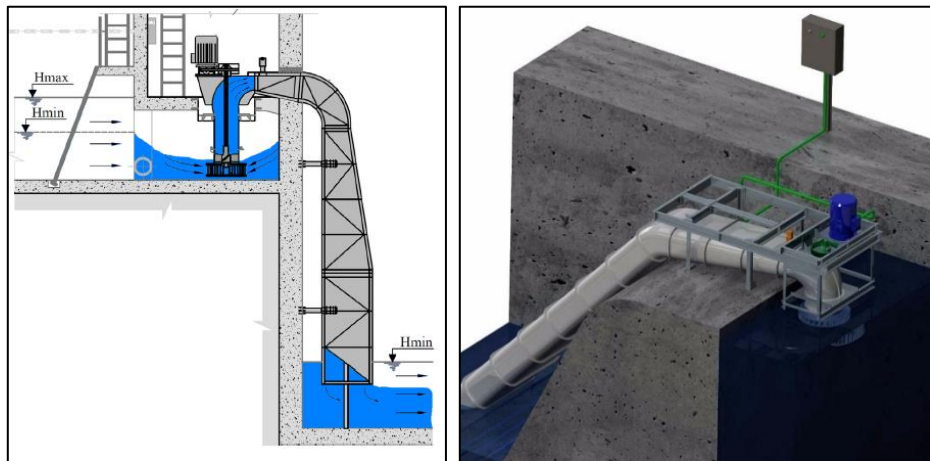


Figura 2-19 Gráfico de eficiencia para una turbina de Vórtice (ZOTLÖTERER, 2018)

2.4.6. Turbina Tipo Sifón

La turbina Tipo Sifón, de ahora en adelante Sifón, es producida por Mavel bajo el nombre de TM Modular Micro Turbine quienes la diseñaron con el propósito de aprovechar sitios con bajo flujo y condiciones de baja altura. Esta turbina está equipada con una hélice tipo Kaplan con álabes ajustables manualmente.

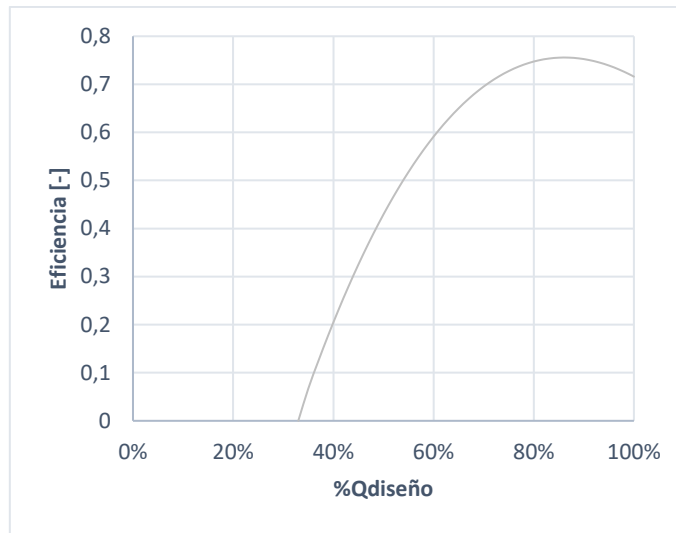
Su nombre se lo debe a la semejanza de su funcionamiento con un sifón o vaso comunicante, dispositivo que permite el transporte de agua por diferencia de presión. En un vaso comunicante una de sus ramas está sumergida en el agua, el flujo asciende por el tubo hasta una mayor altura que la superficie, desaguando por el otro extremo que también se debe encontrar sumergido. Este intercambio de materia se produce sin la necesidad de aplicar energía externa. Utilizando este principio, se hace pasar agua a través de la turbina, aprovechando dicho movimiento para mover el rodete. Se esquematizan estos equipos en la Figura 2-20



*Figura 2-20 Esquema de una turbina de Tipo Sifón
(Adau, 2012)*

Para su óptimo funcionamiento, este equipo necesita mantener, en lo posible, una carga constante, dicho de otra manera, el caudal debe sufrir pocas variaciones para operar la turbina en su punto óptimo de eficiencia, de no ser así y trabajar con un caudal menor al 80 % del máximo admisible, la eficiencia baja significativamente. Esta situación se puede ver en la Figura 2-21, en la cual se

observa que la curva es inclinada y para iniciar su operación necesita un caudal equivalente al 30% del flujo para el cual fue diseñado.



*Figura 2-21 Gráfico de eficiencia para una turbina tipo Sifón
(Zhou, 2019)*

El diseño modular de las turbinas les permite instalarse prácticamente en cualquier parte, para su instalación, necesita una estructura de soporte sólido que sirva de sostén para los equipos, ambos extremos se deben encontrar sumergidos para la operación de ésta. Su instalación no requiere de la implementación de una casa de máquinas que les brinde resguardo. Funciona en condiciones de bajo caudal, entre 0,15 [m³/s] y 5 [m³/s] y desniveles de 1,5 [m] a 6 [m].

A menudo se colocan como unidades múltiples dada la capacidad de instalarse en serie y/o paralelo, aumentando así la capacidad de flujo y diferencia de cotas admisibles para la implementación de estos equipos. Se muestra en la Figura 2-23. una instalación de estos equipos en serie.



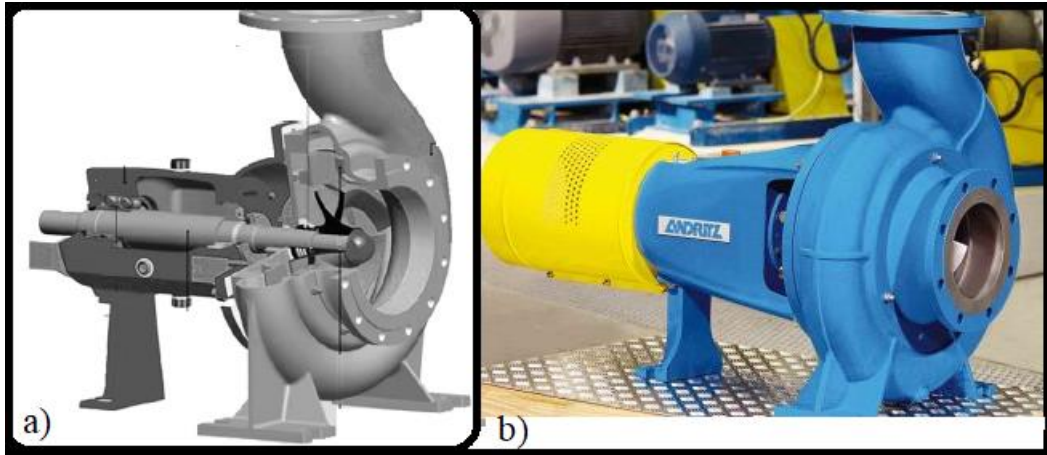
Figura 2-22: Esquema de una bomba centrífuga utilizada para la generación de energía (Adau, 2012)

2.4.7. Bomba como turbinas (BCT)

Las bombas hidráulicas son un equipo ampliamente utilizado en labores de riego, semejante a lo que sucede con el Tornillo de Arquímedes, actualmente se desarrollan aparatos que, además de servir en labores de bombeo, pueden utilizarse en una función inversa y aprovechar los desniveles para la producción de energía, desempeñándose así en dos funciones.

Este mecanismo consiste en una bomba centrífuga estándar que al funcionar en reversa hace las labores de turbina. Esta es una opción atractiva, ya que las bombas son equipos ampliamente comercializados para labores de riego y, por lo tanto, están más disponibles y en general son más baratas que las turbinas. Se muestra en la Figura 2-22, un esquema de estos equipos, donde se ven sus componentes interiores, seguido de una foto real del mismo equipo, como se puede apreciar en ambas fotos, es muy similar a una bomba centrífuga.

Figura 2-23: Instalación en paralelo de turbinas tipo Sifón (MAVEL, 2015)



Sin embargo, las Bombas Como Turbina poseen una menor eficiencia que las turbinas convencionales, especialmente al funcionar parcialmente cargadas, esto se ve en la Figura 2-24, así como también la necesidad de un caudal semejante al $Q_{\text{diseño}}$ para su óptima operación, debido a lo comprometido que se ve la eficiencia al utilizarse ésta con cargas parciales.

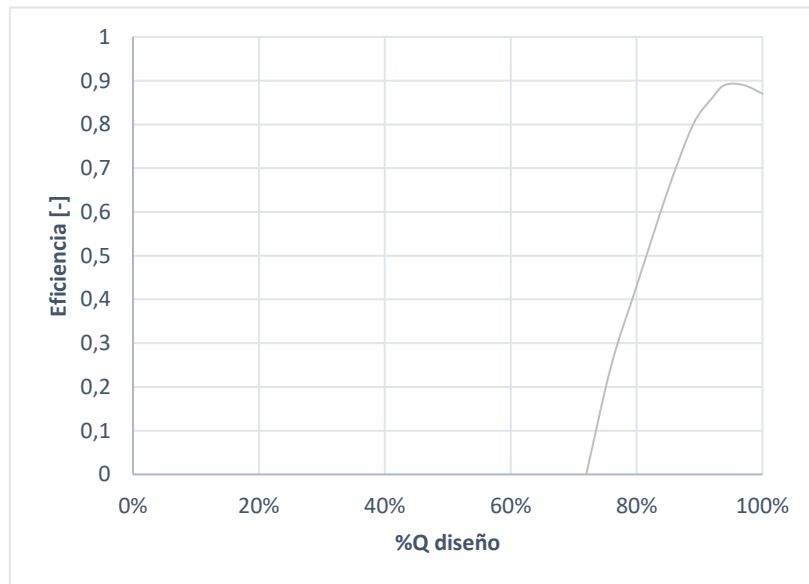


Figura 2-24 Gráfico de eficiencia para una Bomba como Turbina (Andritz, 2015)

Estos equipos funcionan con caudales menores a los de las turbinas convencionales, rango comprendido entre $0,2 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y $0,6 \text{ [m}^3/\text{s]}$, aunque las diferencias de altura que puede salvar están

en un rango parecido a otros equipos; 2 [m] y 80 [m]. Estos equipos también son modulares y utilizan espacios muy reducidos, habitualmente se utilizan asociado a una casa de máquinas.

2.4.8. Turbina Hidrocinética

La Turbina Hidrocinética, es capaz transformar en electricidad la energía que posee el agua manifestada a través de su velocidad, esto se produce sin la necesidad de tener una diferencia de altura. Por lo mismo, la expresión para calcular la Potencia bruta de un aprovechamiento deja de ser la Fórmula I, en estos casos la fórmula para calcular la Potencia queda descrita por la Fórmula V.

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

Donde:

P: Potencia [W]

ρ : Densidad del agua [Kg/m³]

A_t : Área transversal de la turbina [m²]

V: Velocidad del flujo [m/s]

Como se puede observar en la Fórmula V, para la generación de estas turbinas la variable que se puede controlar es la velocidad del flujo, siendo esta variable proporcional a la potencia instalada, en consecuencia, a la energía. Por lo mismo son ideales las secciones de los canales de riego donde se alcancen altas velocidades, siendo lugares potencialmente aprovechables espacios donde la pendiente sea elevada o secciones donde el canal se angoste, produciendo un aumento en la velocidad de la corriente.

La instalación de estas minimiza la utilización de estructuras, siendo requisito para la implementación que los activos se encuentren sumergidos con un sistema de sostén que permita el flujo a altas velocidades pero que impida que la corriente se las lleve, vale decir empotradas o con algún sistema que las mantenga inamovibles.

Existe una cantidad cuantiosa de tipos de turbina Hidrocinética, cuyo diseño depende, al igual que las demás turbinas, de quien sea el fabricante. En general estos equipos permiten la instalación de más de uno a la vez. Se muestran algunos modelos en la Figura 2-25.

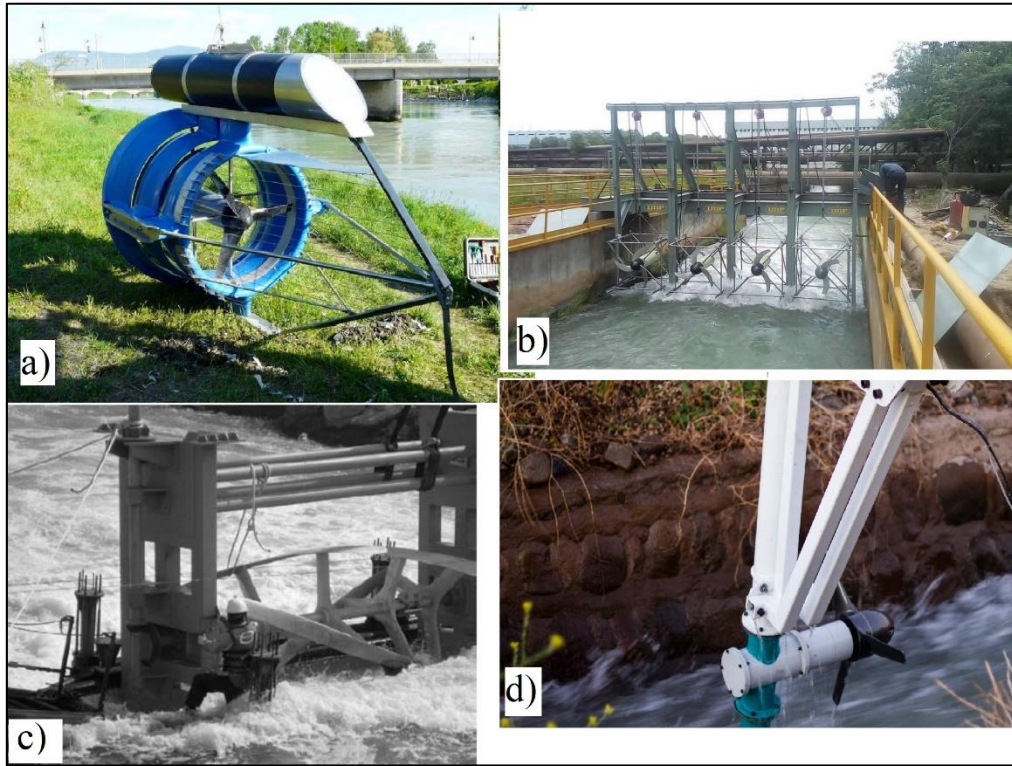


Figura 2-25: a) Turbina Hidrocinética Smart Monofloat b) Turbina Hidrocinética Free Stream. c) Turbina Hidrocinética Gorolov c) Turbina Hidrocinética Kapta Hydro

Los rangos de operación para estas turbinas, a diferencia de las demás, vienen dado por la velocidad del flujo y el área transversal de la turbina. La empresa Smart Hydro Power, cifra los rangos de velocidad para sus productos entre 1 y 3,1 [m/s], mientras que como requerimiento de área necesidad una profundidad mínima del río de 1,1 y de ancho 1,2 [m]. Los requisitos de aplicación para estos activos son muy limitantes, ya que estas combinaciones son difíciles de encontrar en un canal típico de riego, esta combinación requiere la composición de pendientes en canales que permitan la citada velocidad y caudales que permitan mantener una altura de escurrimiento por sobre el metro.

3. Criterios para la Implantación de Tecnologías de Microgeneración en Infraestructura de Riego

Sin lugar a duda, existe un potencial hidroeléctrico aún no desarrollado en Chile. Esto queda de manifiesto en el informe del Ministerio de Energía: “Energías Renovables En Chile” (2014). En el cual se expresa que el potencial eléctrico disponible para la minigeneración es de 138[MW], ver Tabla 3-1, en la primera fila se encuentra contenida la mini y microgeneración. Se debe considerar que el estudio presenta una subestimación del potencial, pues el trabajo se realizó solo con los Derechos de Agua no Consuntivos aprobados hasta el 2012; desde entonces hasta la fecha se han otorgado más DAANC.

Tabla 3-1: Potencial hidroeléctrico disponible por tamaño de centrales, capacidad y potencia media son acumuladas por centrales. (Ministerio de Energía, 2014)

Rango [MW]	Centrales (N°)	Capacidad [MW]	P. Media [MW]
0,1-1	315	138	100
1-9	505	1.848	1.169
9-20	122	1.672	1.044
20-40	78	2.178	1.332
40-100	36	2.115	1.397
>100	24	4.521	2.773

Como se puede ver, existe una fuente de energía aún no explotada en el rango de potencias inferiores a 1 [MW], teniendo esto presente se desarrolla este trabajo, con el objetivo de incentivar la producción de energías no convencionales con turbinas de Microgeneración.

Existen herramientas que nos permiten una rápida elección de equipos, como es el caso de los ábacos, muy conocidos para la elección de turbinas en grandes centrales de generación. También existen otros criterios que a continuación se desarrollan: La oportunidad de asociar distintos equipos de generación a infraestructura ya construida, o generar modificaciones a éstas en vez de hacer nuevas obras que permitan implantar pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, en otras

palabras, la infraestructura ya construida con otros propósitos (riego) se puede modificar para equiparla con plantas hidroeléctricas y así incluir la generación dentro de sus fines. El beneficio de esto es hacer uso de la energía que está ahí, esperando ser utilizada con un mínimo impacto adicional.

A pesar de que la hidroelectricidad convencional (turbinas Pelton, Kaplan y Francis) se asocia a grandes obras y modificaciones de cauces con el propósito de generar mayores desniveles aprovechables, la instalación de turbinas de microgeneración (Turbinas de Flujo Cruzado, Tornillo de Arquímedes, Turgo, Vórtice Gravitacional, Sifón, Bombas como turbinas (BCT) e Hidrocinética) se puede adaptar a estructuras de riego existentes, donde ya hay desniveles susceptibles de ser explotados, minimizando la construcción y la intervención de cauces.

3.1. Elección de tecnología de microgeneración a partir de ábaco.

Los gráficos de selección de turbinas pueden utilizarse como uno de los criterios para determinar el tipo de equipo a instalar, representa un buen punto de partida pues muestran rangos de caudal y caída requeridos para su instalación, resumiendo de manera muy eficiente la información analizada en la revisión bibliográfica, en particular donde se realiza el catastro de los 7 equipos de microgeneración, con los datos recopilados para los distintos activos ahí descritos se elabora el gráfico presente en la Figura 3-1.

Una limitación de este instrumento es la poca sensibilidad que tiene de las condiciones del aprovechamiento. Para buscar el tipo de equipo en un ábaco se necesitan solo dos datos, de esta manera omite condiciones particulares del proyecto.

Por supuesto, como se observa en la Figura 3-1 para una misma combinación de caudal y caída se interceptan más de dos curvas, o sea, para un mismo escenario sirve más de una turbina. Estos esquemas no contemplan ninguna otra variable, como el área disponible en la zona u otra particularidad que se puede generar. Por eso se elabora este trabajo, que tiene por objetivo orientar la selección de equipos para la instalación de tecnologías de microgeneración en canales de riego, teniendo en consideración aspectos más específicos que solo los requerimientos de operación para la turbina.

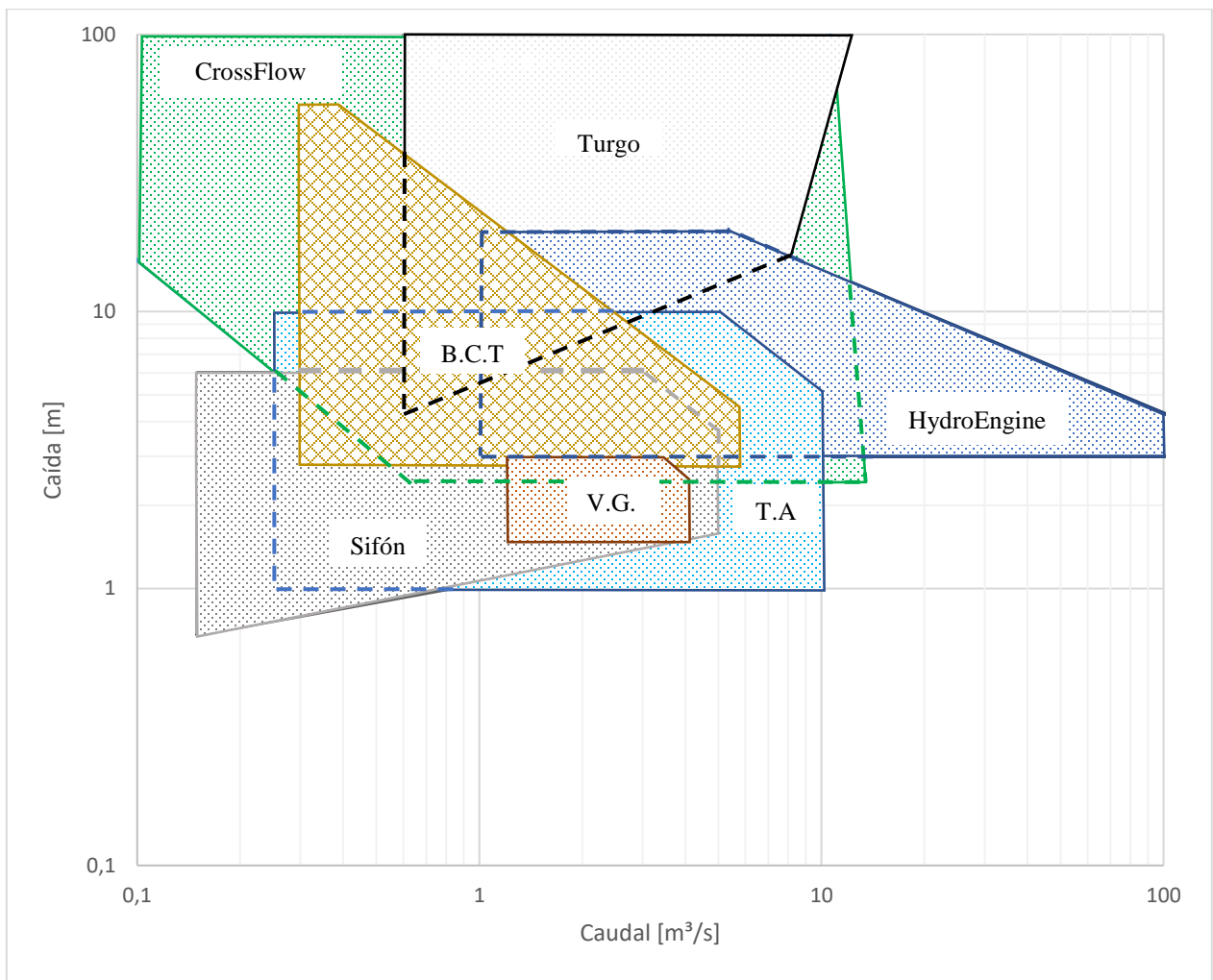


Figura 3-1: Ábaco para la selección de equipos de generación hidroeléctrica, construido con los datos obtenidos en la revisión bibliográfica. En este se muestran las turbinas tipo Sifón, Vórtice Gravitacional (V.G.), Tornillo de Arquímedes, HydroEngine, Bomba Como Turbina (B.C.T.), Turgo y CrossFlow.

3.2. Elección de Tecnología de Microgeneración a partir de la infraestructura existente

Las instalaciones de turbinas en sistemas de riego, se realizan por lo general como centrales de pasada, implantándose a través de pequeñas desviaciones del canal de riego o dentro del mismo. A los desvíos del canal se les conoce como bypass y se utilizan habitualmente, para no intervenir el cauce principal, así en caso de que se necesite dejar fuera de funcionamiento el equipo

electromecánico por labores de mantenimiento u otro, el flujo de agua pasa a través del canal principal mientras que el bypass se cierra para dejar la turbina seca y con ello, fuera de operación.

La utilización de infraestructura existente supone un beneficio para la ejecución de proyectos hidroeléctricos, en tanto que merma la infraestructura para la instalación de una minicentral aprovechando las obras y desniveles ya existentes. Se estima que las Obras Civiles representan un 20% del costo de inversión de un micro aprovechamiento (CNR, 2005), por lo que capitalizar infraestructura existente rebaja el total del monto invertido.

En la Figura 3-2 se muestra un esquema con una configuración típica de un circuito de riego, y obras tipo que podemos encontrar en éste. La imagen extraída del texto “*Mini-hydro power generation on existing irrigation projects: Case study of Indian sites*” (2012) señala locaciones con potencial aprovechamiento para la producción de electricidad.

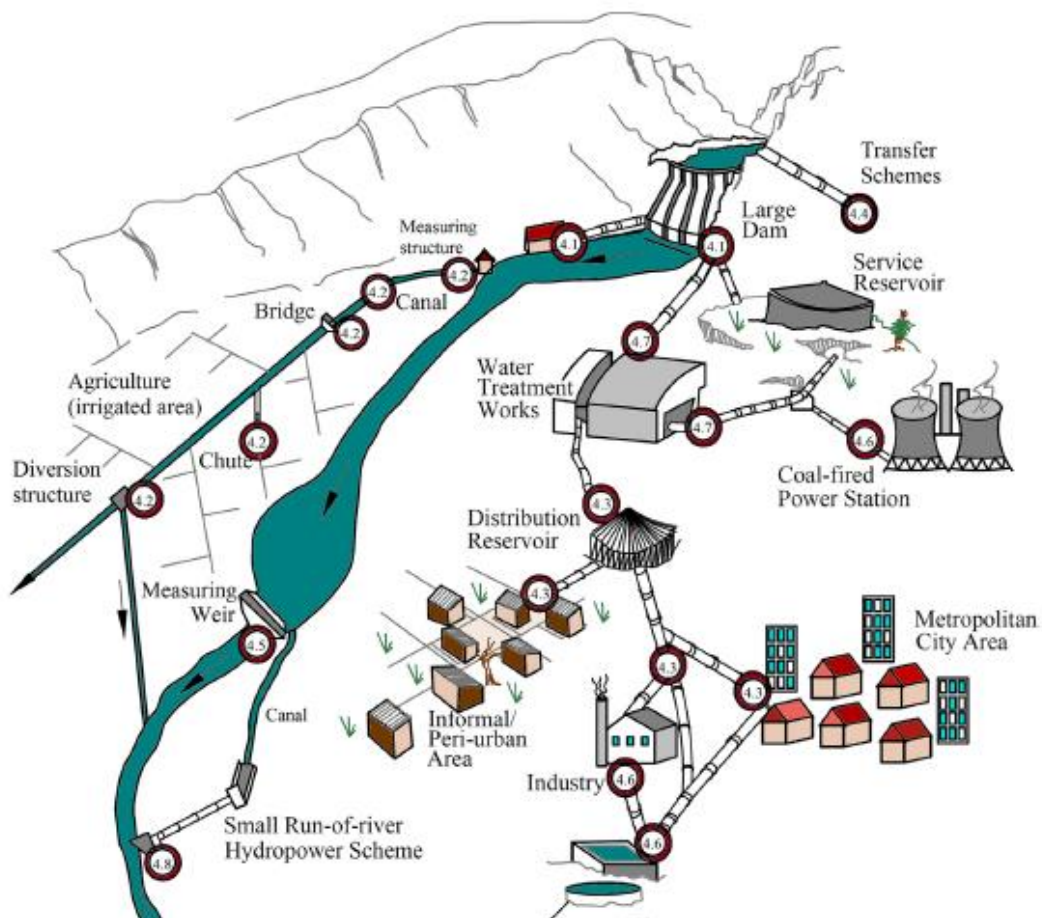


Figura 3-2: Potenciales localizaciones para la instalación de una microcentral hidroeléctrica. (Adau, 2012)

3.2.1. Obras de Derivación y Tomas de Agua

Un circuito de riego, típicamente parte con una derivación de un río o un cauce principal para llegar hasta los usuarios, donde se distribuyen sus aguas para suministro de los agricultores y regantes. Esta derivación es conocida como Bocatoma u Obra de Toma.

Las estructuras de desvío pueden ser sitios ideales para la implementación de proyectos de energía hidroeléctrica a baja altura, en primer lugar, porque la infraestructura existente puede utilizarse, reduciendo el costo de construcción. Y en segundo lugar porque muchas estructuras de desvío se encuentran, por lo general, emplazadas de forma transversal al río, configuración que permite utilizar todo el flujo en la generación hidroeléctrica (Loots, 2015).

En este sentido, las turbinas pueden ser instaladas en la misma estructura de derivación, usualmente tras una compuerta que le permita salir de servicio cuando así se requiera o al lado de estas, en cuyo caso necesitan un bypass que de la facilidad de derivar las aguas hasta la turbina. En estas obras, se tiene abundante caudal y un desnivel bajo. Las turbinas de Sifón o el Tornillo Hidráulico se pueden instalar en una obra de derivación.

Se muestra a continuación en Figura 3-3, las imágenes de dos estructuras de derivación en las cuales se puede apreciar el desnivel producido entre aguas arriba y aguas abajo de la compuerta. Estas imágenes corresponden a instalaciones típicas de Chile; en particular las fotos corresponden a obras en la primera sección del Río Aconcagua, región de Valparaíso.



Figura 3-3: Ejemplo de obra de derivación, ubicada en el Río Aconcagua. A la izquierda se muestra un marco partidor y a la derecha una compuerta lateral.

3.2.2. Canales con fuertes pendientes

Es común encontrar en los canales de riego tramos con elevada pendiente, la que en general, se produce por la configuración topográfica del circuito conductor del agua o producto de alguna singularidad, como es el caso de una restitución o en un trasvasije de canales.

Un trasvasije se produce cuando un canal alimenta a otro vertiendo sus aguas en este último que se encuentra a una cota inferior que el primero; en consecuencia, se produce una zona con potencial para la generación. Así mismo, una restitución se genera cuando el canal devuelve sus aguas al cauce principal, donde también se obtiene un cambio de nivel.

La diferencia de cotas se puede desarrollar en extensiones poco prolongadas de terreno, lo que se traduce en una pendiente fuerte del canal, esta particularidad conlleva un incremento en la velocidad, generando condiciones idóneas para la implantación de turbinas Hidrocinética, o un Tornillo de Arquímedes, cuya pendiente de aplicación puede hacerse coincidir con la inclinación del fondo del canal.

Si la diferencia de cotas se produce de manera abrupta, se construyen caídas verticales. Estas caídas se pueden utilizar en muchos casos para albergar equipos cuyo ingreso a la turbina se realice mediante una toma en presión, tal es el caso de las turbinas CrossFlow, Turgo o HydroEngine, todas ellas con requerimiento de una casa para albergar sus equipos.

3.2.3. Puentes

Los puentes (Figura 3-4), sea cual sea su propósito (peatonal o vehicular), a pesar de que no tienen directa relación con el riego, se encuentra usualmente sobre canales de este designio.

En cuanto a estas estructuras se refiere, presentan grandes oportunidades de desarrollo micro hidroeléctrico de baja altura. Los puentes brindan muchas bondades para la instalación de turbinas Hidrocinética de varios tipos, ya que su estructura es una buena fuente de anclaje para las máquinas, lo que minimiza la necesidad de obras que brinden sostén a los equipos.



Figura 3-4: Ejemplos de puentes y cruces de calle con potencial aprovechamiento

3.2.4. Estaciones de aforo

Es común encontrar en los canales de riego estaciones de aforo (Figura 3-5). Las estaciones de medición se encuentran generalmente, compuestas por una grada o una caída, esta es una locación idónea para la instalar una microcentral, producto del desnivel que se produce en ellas, requisito para su funcionamiento.

Es fundamental para el correcto funcionamiento de la sección de aforo, que éste no se encuentre influenciado por aguas abajo, ahogando el lugar de la medición. Este requisito supone una dificultad para la implantación de estas tecnologías puesto que su instalación alterara las condiciones de flujo. En el caso de que se instale una turbina acá, y no se tomen precauciones, se producirían lecturas erróneas con el sistema ya mencionado, producto de la influencia de la máquina, la altura de escurrimiento será mayor, influenciada por la condición de borde impuesta por la turbina.

Existen formas que permiten superar esta dificultad, una de ellas es no instalar el equipo directamente en el canal y hacerlo mediante un bypass; se puede producir un desvío del agua, que permita dedicar una porción del caudal fluyente para la generación y la otra fracción de flujo dejar que pase a través de la sección de aforo, así el caudal total se podría obtener como la combinación entre el caudal aforado y el de la turbina.



Figura 3-5: Fotografía de una sección de aforo. El método de medición de caudal en esta sección se realiza a través de imponer un régimen crítico en el canal

Se hace necesario nota que existen tecnologías para cálculo de caudal más modernas que la descrita. Este es el caso de Sensores de Ultrasonido; que relaciona la velocidad del flujo y el área de escurrimiento, así la medición no se ve afectada por la influencia de la turbina, dicho de otra manera, la instrumentación de este método en un canal de riego elimina el error asociado a aforar a través del método de altura crítica, influenciado por la máquina de generación.

La posibilidad de instalar un equipo en cualquiera de las obras antes mencionada, queda siempre condicionada por un análisis estructural que acredite la factibilidad de la instalación de la máquina sin comprometer el funcionamiento ni la estabilidad de la obra.

3.3. Elección de Tecnología de Microgeneración a partir de análisis económico

Desde el punto de vista económico, el atractivo de la implantación de Tecnologías de Microgeneración viene dado por la posibilidad de tener rédito a través de la electricidad producida, de esta forma poder tener retribución de la inversión realizada por la implantación de una Planta de Microgeneración.

El Flujo de Caja típico de un proyecto de estas características viene dado por los costos de inversión (costos directos e indirectos), además de los ingresos por concepto de venta de energía.

3.3.1. Costos de inversión

El costo de inversión de una central pequeña (mini o micro) viene dada por dos componentes: costos directos e indirectos. Los costos directos a su vez quedan descritos por los costos de las obras civiles (OOC) y el de los elementos eléctricos necesarios para llevar la energía generada hasta la red de distribución. Los costos indirectos vienen dados por las utilidades de los contratistas, imprevistos de las obras, estudios y otros elementos que se presentan como un porcentaje de los costos directos.

- a. **Costos de Obras Civiles:** Son los costos relacionados con la construcción y la estructura de la Planta Hidroeléctrica, los cuales, consisten en compuertas que permitan derivar el agua a la central o sistema similar, el método de conducción de agua, tubería en presión, casa de máquinas, cierres perimetrales, entre otros. Típicamente estos costos se cifran entre un 20% y un 30% del total del Proyecto (CNR, 2005).

Es importante recordar que la posibilidad de utilizar infraestructura existente significa un ahorro en esta materia.

- b. **Costos de Equipo Electromecánico:** Este ítem de costos de inversión contiene los valores de la turbina, generador, variadores de frecuencia, compuertas, sistemas de control, entre otros. Estos costos representan el 50% y 60 % del presupuesto de una Microcentral. Se debe considerar que la relación entre la potencia instalada y el valor del equipo no es lineal, sino más bien tiene una forma exponencial decreciente (CNR, 2005).

La información acá expuesta se resume en la Tabla 3-2: Composición media de los costos en pequeñas centrales , donde se muestra el desglose de los costos de un proyecto.

Tabla 3-2: Composición media de los costos en pequeñas centrales (CNR, 2005)

Componente	Costo (%)
Equipos Electromecánicos	50-60
Obras Civiles	30-20
Ingeniería	10

3.3.2. Costos Anuales

Otra variable para considerar, son los costos anuales. Éstos son fundamentalmente costos fijos, siendo aquellos que no dependen del nivel de producción de la Central, y por lo mismo están siempre presentes. Los costos fijos se dividen en directos e indirectos. Los primeros originan por la operación y mantención de la Central (costos operacionales) y los segundos, los compuestos por los costos del interés al capital invertido, la depreciación de éste y los seguros e impuestos territoriales.

Los costos de mantención se relacionan con la inversión realizada, a pesar de tener una incidencia menor en centrales pequeñas en contraste con las centrales de mayor envergadura. En general, se puede decir que su valor anual es un porcentaje variable entre 1% y 3% de la inversión realizada para equipos mecánicos y 1% a 2% para obras civiles, totalizando así un 5%.

3.4. Criterio para la implantación de Tecnologías de Microgeneración a partir de Análisis Multicriterio

Como se ha observado hasta ahora, la elección de una turbina para la microgeneración considera fundamentalmente dos variables, caída y caudal disponible para el aprovechamiento. En las secciones 3.2 y 3.3 se muestran otras alternativas que orientan la elección de equipos de generación basados en las obras de un circuito de riego y en el análisis económico respectivamente.

Por cierto, estos criterios otorgan más de una alternativa sin considerar otros aspectos relevantes al momento de la elección de los equipos. A raíz de esto se implementa un razonamiento de elección justificándose en la cuantificación de aspectos cualitativos de los equipos de generación, un análisis multivariable.

El análisis multicriterio, es un instrumento de evaluación de diversas posibles soluciones a un mismo problema, éste consiste en discurrir múltiples criterios relevantes para un proyecto y discernir entre ellos. Para la elección de la solución a través de sus variables, se utilizan puntajes y ponderadores de acuerdo con el criterio. Dicho de otra manera, a cada aspecto se le asigna un puntaje y cada criterio tiene un cierto peso al momento de la elección, así la mejor alternativa es la que obtiene mayor puntaje.

La idea original para el análisis multicriterio se da a partir del texto “*Best Available Techniques for Ultra Low Head Tidal and River Hydropower*”, de J. van Barket, al análisis que en ese texto se describe, se le hacen modificaciones considerando la realidad local y otros aspectos a tener en cuenta, dado el lugar de emplazamiento para una tecnología de generación en Chile, teniendo también en presente rasgos característicos de los equipos.

Se describen a continuación las variables que puede incluir un análisis multicriterio:

3.4.1. Relación entre la energía producida y el costo de inversión [kWh/\$]

Como se enunció en la revisión bibliográfica, la potencia instalada incide directamente en el tamaño de las obras necesarias para la implantación de cualquier tecnología de generación hidroeléctrica. Obras de mayor envergadura implican una mayor inversión inicial.

Teniendo el valor estimado total del Proyecto, incluyendo obras civiles y eléctricas, compra e instalación de equipos y los costos indirectos asociados al mismo, se puede obtener la relación entre la energía producida, al multiplicar la potencia por su factor de planta y dividir este resultado en la inversión total requerida para el Proyecto. Este indicador, nos muestra cuanta potencia se produce bajo el mismo nivel de inversión

Es deseable obtener una mayor producción de energía a un mismo costo; entonces al categorizar las opciones se le asigna la nota más alta a la que posea mayor indicador, y la nota menor en caso contrario

Se recomienda asignar gran importancia a este indicador, entre un 20% y 25% ya que es un factor clave en la evaluación económica del Proyecto, sin embargo, es necesario evaluar otros aspectos que se ven más adelante.

3.4.2. Disponibilidad de servicio técnico

Los equipos de generación, en particular los de microgeneración hidroeléctrica, poseen planes de mantenimiento. Asociado a este procedimiento existe el requerimiento de una revisión periódica que verifique el correcto funcionamiento de todos los componentes del equipo y cambio de piezas defectuosas.

Este plan de mantenimiento debe ser realizado por un especialista, pudiendo ejecutar estas labores el fabricante o alguien que cuente con la capacitación adecuada para desarrollar tales funciones, también puede ser cualquier empresa o persona que cuente con dichos conocimientos.

La disponibilidad de servicio técnico es una variable muy importante a considerar, ya que de ésta depende el correcto funcionamiento de todos los componentes de la turbina y la vida útil que tenga. Por lo descrito, la existencia de servicio técnico de fácil acceso implica muchos beneficios en contraste con la inexistencia de éste.

Un equipo de generación que posea un servicio técnico diligente, que realice mantenciones periódicas y que sea capaz de resolver problemas más complejos como, por ejemplo, la ruptura de álabes debe preferirse por sobre un equipo que no posea estas características o que solo las tenga parcialmente.

Así, se debe asignar un mayor puntaje a un equipo que cuente con un servicio técnico más completo y una menor nota a uno que no lo disponga o lo haga de forma parcial.

Este indicador junto con el que relaciona la energía producida y el costo de inversión, son los más importantes y debieran tenerse en cuenta durante cualquier evaluación multicriterio. Por lo mismo se recomienda ponderaciones comprendidas entre el 20% y el 25%.

3.4.3. Vulnerabilidad de acuerdo con el lugar de emplazamiento:

En lo que se refiere al contexto social del lugar de emplazamiento, es una variable a tener presente de acuerdo con las características particulares del lugar donde se instala el equipo de microgeneración.

Los equipos de microgeneración, en su mayoría, tienen la posibilidad de ser instalados sin la necesidad de una casa de máquinas que proteja su montaje (los equipos eléctricos y mecánicos necesarios para el correcto funcionamiento). Esto es una característica que aporta beneficios desde el punto de vista económico, ya que se requiere una menor cantidad de obras civiles y menor utilización de espacios, entre otros.

Sin embargo, desde otra mirada, esto es una cualidad que deja a los equipos electromecánicos vulnerables ante las condiciones ambientales, atmosféricas y sociales, facilitando así la posibilidad de que éstos sean dañados por las condiciones climáticas, por terceros o se sufran robo de sus componentes.

Máquinas como el Tornillo de Arquímedes y la turbina tipo Sifón quedan completamente expuestas a las condiciones exógenas y a potenciales daños que los pudieran afectar. Se encuentran en desventaja comparadas con la turbina Turgo o similares que se instalan bajo el resguardo de una casa de máquinas.

Esta variable de evaluación se debe aplicar en contexto; según la ubicación del equipo, puede ser necesario restar importancia a la vulnerabilidad de este con respecto a su entorno, al encontrarse en lugares aislados o de difícil acceso.

3.4.4. Fish Friendly

La Implantación de un Equipo de Generación Hidroeléctrica involucra alteraciones en el canal, incluso en la arista medioambiental, en particular, se produce un impacto negativo sobre la fauna acuática que pudiera existir en el sistema, particularmente en los peces.

Los equipos de microgeneración, como las turbinas de Vórtice Gravitacional y Tornillo de Arquímedes tienen la particularidad de ser equipos “amigables con los peces” (Fish Friendly), en un sentido práctico esto se interpreta en que permiten la circulación de fauna marina a través de la turbina, compatibilizando la vida de estos organismos con la Generación Hidroeléctrica.

Se aconseja incluir esta variable en caso de ser necesario, es decir, cuando el canal transporta peces que pudieran ver alterado su normal ciclo de vida producto de la existencia de un equipo de generación hidroeléctrica..

3.4.5. Modularidad de equipos

Un equipo modular genera un interés favorable ya que, durante la vida útil del proyecto, pudiesen suscitarse cambios en los derechos de aprovechamiento, especialmente en su ubicación. Esta característica confiere al dueño la posibilidad de transportar el equipo y llevarlo hasta una nueva ubicación, hacer fácil su montaje y desmontaje en caso de ser requerido por mantención o cambio del activo.

Las turbinas tipo Sifón e Hidrocinética en general, son las que poseen un diseño más modular, las turbinas de Vórtice, si bien poseen un equipamiento electromecánico de un tamaño reducido, capaz de ser transportado, tiene el inconveniente que el contenedor de hormigón requiere ser reconstruido si se desea mover, el Tornillo de Arquímedes también tiene una modularidad reducida, ya que se puede mover, aunque es muy difícil dada la gran envergadura de estas máquinas. Finalmente, las turbinas que se encuentran en una casa de máquinas, si bien se pueden transportar, la gran cantidad de obra que su instalación conlleva las hace desfavorable en este ítem.

3.4.6. Antecedentes de la tecnología

Otro de los criterios susceptible a ser evaluado al momento de la elección de un equipo de microgeneración, es la síntesis que se puede tener respecto a casos de éxito y revés que posee tecnología y su fabricante. Dicho de otro modo, antecedentes de los mismos activos instalados en similares condiciones significan una referencia, cuya importancia radica en reflejar el porvenir exitoso, o no del Proyecto.

Es habitual en estos tipos de proyectos pedir como antecedente al fabricante casos similares al que se estudia, donde su tecnología haya sido probada.

En generación en canales de riego, la tecnología más probada es la turbina CrossFlow, seguida por el Tornillo de Arquímedes y la de Vórtice (Gho Barba J. , 2016). No se encuentran casos de aplicación de tecnología tipo Sifón. Las turbinas Pelton, Kaplan y Francis tienen una reputación probada a nivel mundial.

3.4.7. Beneficios locales

Otro aspecto que considerar son los beneficios locales que aporta la instalación de un equipo de microgeneración, no solo en lo económico a su ejecutor, sino en otros items, valga como ejemplo, la generación de energía en lugares donde no hay acceso a ésta. Otro ejemplo puede ser la plusvalía que aporta al lugar y al entorno. La presencia de un equipo de microgeneración pudiese cambiar el paisaje aportando un enriquecimiento al ornato del lugar de emplazamiento, ósea, la instalación de una casa de máquinas que entorpece el paisaje puede ser evaluado con una peor calificación que un Tornillo Hidráulico que tiene un diseño más amigable.

También se puede incluir en este ítem lo perjudicial que resultar un modelo por sobre el otro, las turbinas que necesitan grandes velocidades de giro en el rodete, como la Turgo o CrossFlow producen ruidos molestos que afectan la sana convivencia en localidades situadas en las cercanías de la instalación.

3.5. Conclusiones del capítulo

Son múltiples los matices a considerar al momento de evaluar el emplazamiento de una microcentral hidroeléctrica, un análisis centrado solo en las características topográficas e hidrológicas, como el caso de los ábacos, es muchas veces insuficiente ya que desprecia particularidades de cada proyecto.

Existen diversos criterios para elegir el equipo de generación que más se adecúe a las necesidades de cada caso. Además de los aquí enunciados, se pueden considerar otros como, por ejemplo, centrado en la eficiencia peak del equipo, o cómo varía la curva de eficiencia según la carga de la central. Este último podría ser muy importante en canales que sufran variaciones abruptas en el flujo de los afluentes.

De todas formas, se puede incorporar muchas variables al Análisis Multicriterio permitiendo hacer una comparación más refinada al momento de la elección de la turbina. Darle un valor cuantitativo a la cualidad de un equipo supone una herramienta muy útil, por lo mismo este método requiere poseer la mayor cantidad de información de los activos a seleccionar, en base a dicho conocimiento, el análisis permite mejorar la selección.

Incluir herramientas de decisión como las descritas y sugeridas para el Análisis Multicriterio, se debe hacer con el cuidado correspondiente para no estar incorporando una misma variable en dos normas distintas, valga como ejemplo el de las variaciones de flujo, que podría incluirse tanto en el ítem: Adaptación a las condiciones existentes, así como también tratarse como un criterio individual que solo relacione las variaciones de caudal .

La evaluación económica basada en precios unitarios da una buena estimación en fases de preinversión de un proyecto acerca de los costos, tanto en materia de Obras Civiles, como en Equipo Electromecánico y costos indirectos asociados a la materialización de una planta de microgeneración. Se debe tener presente que en ningún caso estos precios reflejan el valor real de la planta, el cual viene dado por estudios detallados en etapas posteriores del Proyecto.

Existe potencial aprovechamiento en las obras existentes en canales de riego. Si bien, la presencia de equipos de generación afecta el régimen de flujo aguas arriba, alterando el correcto funcionamiento de las obras presentes en el canal, cuya forma de operar se basa en la formación de régimen crítico para su correcto trabajo (marcos partidores y obras de distribución de aguas). Está la naciente posibilidad de modernizar los sistemas convencionales de reparto y medición de aguas

a través de la instrumentación y sistemas automáticos de control de flujo, posibles de financiar producto de los ingresos obtenidos por conceptos de venta de energía.

El objetivo de estos criterios es dar herramientas que permitan orientar la elección de los equipos de microgeneración en base a los criterios mostrados. Fruto de las similitudes de los activos, el discernimiento de la tecnología no es tan evidente como sí lo es a gran escala, donde el espectro de elección de máquinas es solo tres.

Los criterios que aquí se entregan orientan la elección, aún así, como se vio en cada capítulo, se tendrán una o dos alternativas técnicamente igual de atractivas. En tales casos la decisión debe hacerse de acuerdo con los intereses personales del mandante.

Se hace necesario recordar que los criterios contenidos en este capítulo son válidos solo en etapas tempranas de un proyecto, cuando las particularidades de cada situación no son tan condicionantes. Estudios más minuciosos de cada proyecto, en donde se analice un gran número de posibles soluciones siempre darán la mejor alternativa.

4. Aplicación práctica de los Criterios Hidráulicos a casos reales

Con el propósito de aplicar los criterios descritos en el Capítulo 3, se emplean los razonamientos ya descritos a dos casos con un potencial de generación hidroeléctrico susceptible de ser aprovechado. Los casos seleccionados corresponden a un Proyecto más grande, el cual lleva por nombre: “*Unificación de Bocatomas Primera Sección del Río Aconcagua, Región de Valparaíso*”.

En primer lugar se aplican los Criterios al Proyecto que mejora el afluente que alimenta los canales Los Cantos y San Rafael. Y el segundo, al Proyecto de la construcción de la unificación del Canal matricial Hurtado.

El objetivo de este capítulo es mostrar cuatro alternativas de tecnologías y cómo éstas pueden ser implementadas en canales de riego. De esta manera, analizaremos en detalle las tecnologías de generación con turbinas CrossFlow, Tornillo de Arquímedes, tipo Sifón y turbina de Vórtice Gravitacional. La primera por poseer características de implantación semejantes a otras turbinas como la HydroEngine, Pelton y Turgo. Por otra parte, las tres restantes se consideran por ser tecnologías innovadoras.

4.1. Canal Unificado San Rafael-Los Cantos

El lugar de emplazamiento, donde se proyecta la construcción de la Microcentral de Generación Hidroeléctrica, se encuentra al norte de la ciudad de Los Andes, ubicado entre ésta y la carretera General San Martín (Figura 4-1: Vista satelital del lugar de emplazamiento para el proyecto de la microcentral de generación hidroeléctrica). Cercano al lugar, al sur de éste, se encuentra un condominio poblado a 30 [m] aproximadamente.

El acceso al lugar se hace a través del camino de tierra que se encuentra al costado de la ruta que conecta la Carretera con la ciudad de Los Andes, para llegar al lugar, se deben recorrer aproximadamente 550 [m] desde la ruta principal a través de un camino de tierra.

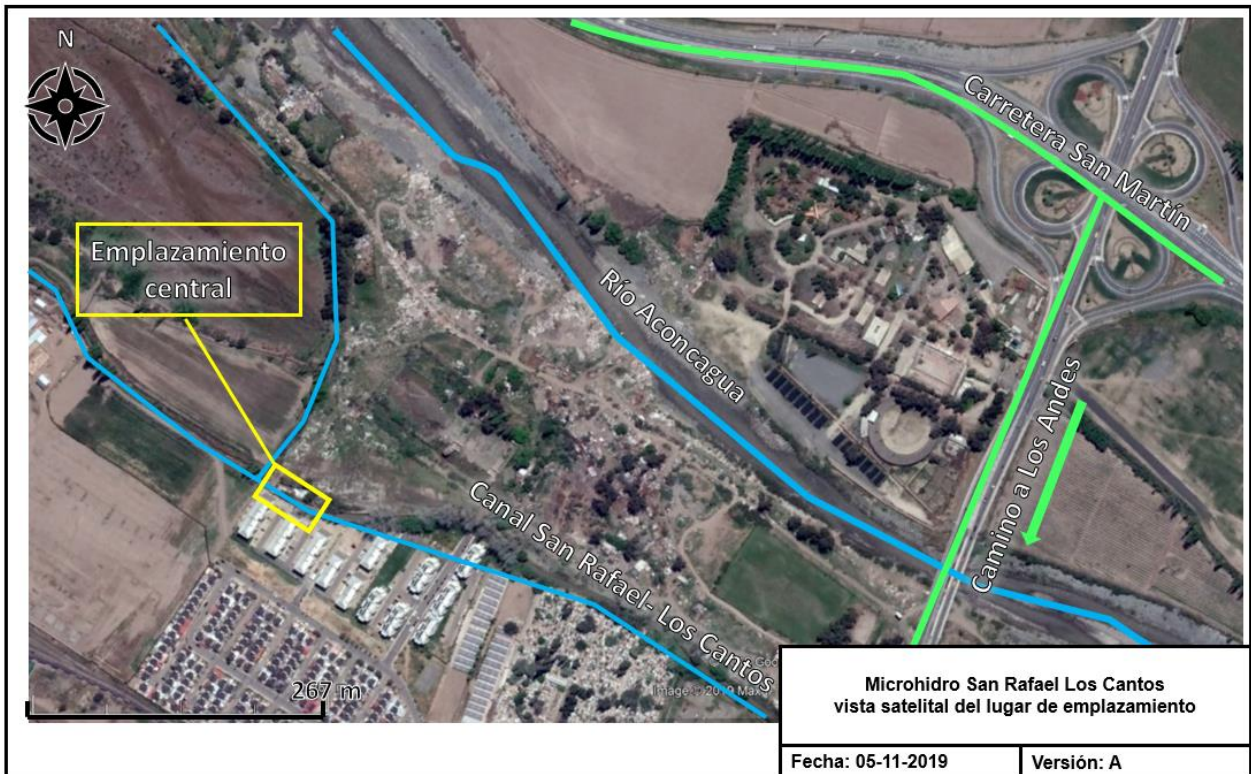


Figura 4-1: Vista satelital del lugar de emplazamiento para el proyecto de la microcentral de generación hidroeléctrica

La situación en el Canal Unificado San Rafael-Los Cantos ubicado al norte de la ciudad de Los Andes y al sur de la carretera San Martín, se basa en que éste presenta un potencial hidroeléctrico aún no aprovechado. El Canal, de sección rectangular con un ancho de 2[m] recubierto en hormigón, se aproxima hasta un salto hidráulico continuado de una rasante pronunciada del lecho de fondo, provocando un desnivel importante.

En la actualidad, el Canal Unificado San Rafael-Los Cantos, salva este desnivel mediante un vertedero lateral y una pequeña estructura o escalera, para con posterioridad, presentar una rampa o rápido de fondo liso.

La disposición descrita queda mejor representada a través de las fotografías dispuestas en la Figura 4-2, que corresponde a un esquema de la vista en planta de la situación actual, y sobre ésta se ve inserto un registro fotográfico de la situación actual. En el esquema se señala además el punto desde y hacia donde se extrajeron las tomas.

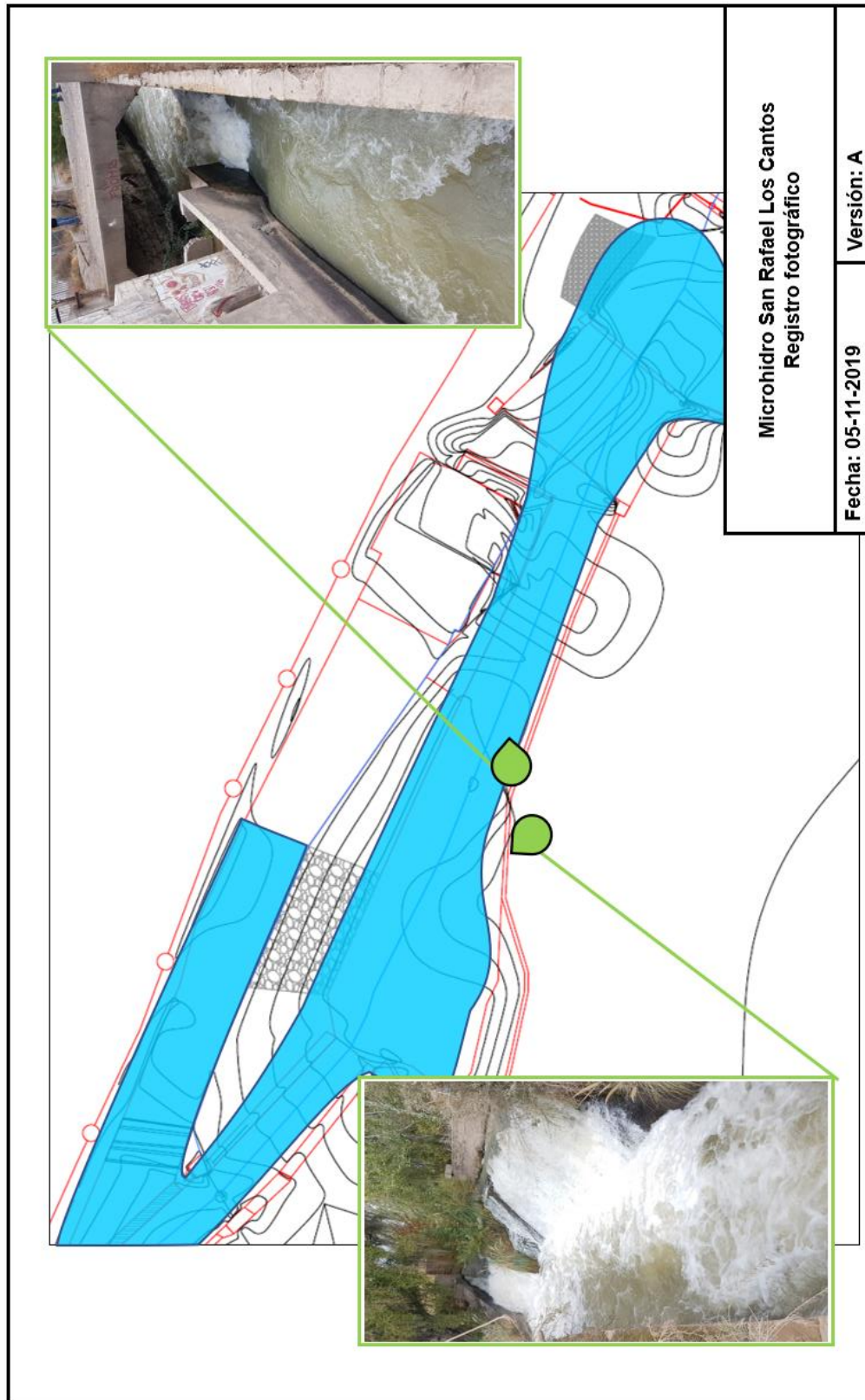


Figura 4-2: Registro fotográfico de la situación actual presente en el canal San Rafael- Los Cantos

Para complementar el entendimiento de las condiciones actuales, se muestra en la Figura 4-3 un perfil topográfico de lo descrito. En éste se indican las cotas de fondo de donde se concluye que existe un desnivel de 4 [m] aproximadamente entre las cotas 814,14 y 809,5. Este desnivel corresponde a la primera caída que se muestra en la Figura 4-2. Cabe también señalar que el caudal máximo de la zona se cifra en 6,2 [m³/s].

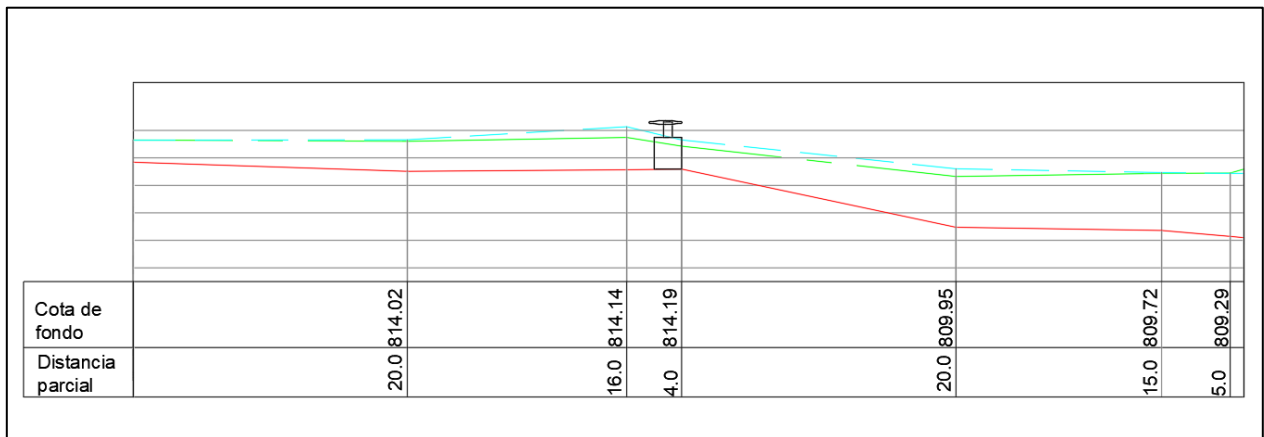


Figura 4-3: Perfil topográfico Canal Unificado San Rafael- Los Cantos

Nos encontramos entonces en presencia de un potencial aprovechamiento hidroeléctrico. Con los datos de caída y caudal máximo disponible, se obtiene que el potencial bruto de generación está dado por la Fórmula (I) y tiene un valor de 240 [kW]. Se hace necesario mencionar que este potencial aún no se encuentra corregido por el factor de eficiencia propio del equipo generador, lo que se aplica más adelante.

4.1.1. Elección del Equipo Electromecánico para el aprovechamiento

El Aprovechamiento Hidroeléctrico estudiado, posee una caída de 4 [m] y un caudal de 6,2 [m³/s]. Esta información es necesaria para calcular el potencial de generación y suficiente para la elección del tipo de turbina a través de un ábaco como el diseñado en la Sección 3.1.

Se muestra en la Figura 4-4 el ábaco de decisión para este caso; en dicho elemento se señalan las características del canal: caudal y caída, lo que sustenta la elección de turbinas.

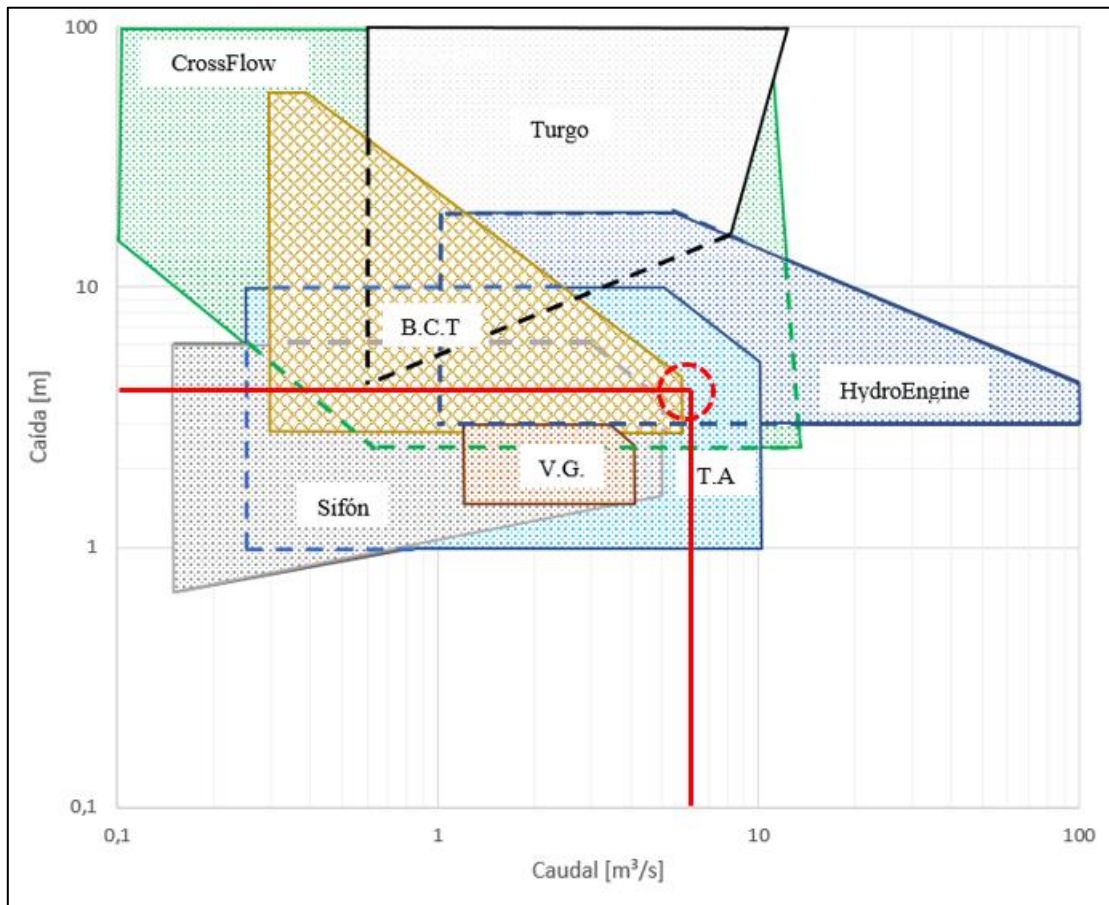


Figura 4-4: Elección de turbinas a partir de Ábaco para el canal unificado San Rafael-Los Cantos. En éste, las siglas T.A, V.G, y B.C.T corresponden a las turbinas Tornillo de Arquímedes, Vórtice Gravitacional y Bomba Como Turbina respectivamente

En primera instancia, de la Figura 4-4 se infiere que las turbinas que sirven para las condiciones del aprovechamiento son: el Tornillo de Arquímedes (T.A.), CrossFlow e HydroEngine. Un análisis con mayor detalle, que contemple la utilización de más de un activo, aporta otras soluciones para aprovechar el potencial existente en esta zona.

Se puede observar, además, que este método de elección es una herramienta útil y sencilla al ser gráfico y directo. Pero posee limitaciones, una de ellas es que, como se aprecia en este caso existen 3 turbinas que se adaptan a las condiciones topográficas e hidrográficas a ser aprovechadas tal y como están dadas. Si se considera la posibilidad de instalar turbinas en serie y/o paralelo, el

espectro aumenta haciendo posible la instalación de una turbina de Vórtice Gravitacional, tipo Sifón e incluso una Bomba Como Turbina.

En lo que prosigue, se utilizan las turbinas de tipo CrossFlow e HydroEngine, Tornillo de Arquímedes tipo Sifón y de Vórtice Gravitacional. Las dos primeras : CrossFlow e HydroEngine, se han agrupado y optado trabajar solo con la de Flujo Cruzado, dada la similitud en el requerimiento de obras para su implantación; una casa de máquinas, una tubería en presión y una cámara de carga. En consecuencia, trabajar solo con una de ellas, para fines de este estudio, se considera extensivo para el segundo.

El Tornillo de Arquímedes, la de Vórtice Gravitacional y la turbina Tipo Sifón, representan una tecnología innovadora, la primera y la segunda ya utilizadas en Chile (Gho Barba J. , 2016) y la tercera, una tecnología irruptora para el mercado chileno, ya utilizada en otras partes del mundo.

Se considera solo la generación, consecuencia de esto es que la Bomba reversible queda fuera del análisis puesto que no se proyecta la operación de su doble función.

4.1.2. Obras necesarias para la implantación de las turbinas

- Turbina Tornillo de Arquímedes

Para la implantación de un Tornillo de Arquímedes, se opta por utilizar las obras existentes e implantar éste de manera directa en la infraestructura del canal, en la vista en planta de la Figura 4-5 se puede observar la bifurcación del mismo; una rama alimenta la Turbina y una segunda actúa como Obra de Excedencia.

La proyectada Obra de Excedencia es la reutilización del vertedero lateral existente, el cual debe ser reparado y acondicionado para tales fines. El afluente a la turbina también requiere un reacondicionamiento, en particular una ampliación que le permita albergar la máquina y sus grandes dimensiones, el Tornillo capaz de turbinar el caudal máximo (6,2 [m³/s]) posee un diámetro de 3,6 [m] .

Este tipo de equipos posee una eficiencia máxima de generación de 0,89. Esta unidad es capaz de aprovechar toda la caída disponible, de igual forma el caudal, por lo que la potencia bruta instalada

para esta configuración son 232 [kW]. Cantidad menor que los 300 [kW] como requisito para optar a los beneficios de la Ley de Generación Distribuida.

Adicional al acondicionamiento de las obras existentes, se proyecta también la construcción de un vertedero lateral que trasvasije sus aguas desde el canal de aducción hacia el canal lateral en caso de eventualidades, que impliquen dejar el mecanismo generador fuera de operación.

El vertedero lateral se considera con una carga admisible de 0,25 [m], un coeficiente de gasto de 0,4. De la Fórmula V, se obtiene que el largo de la estructura mencionada debe ser 7,0 [m]

$$L = \frac{Q}{C_c \sqrt{2gH}} \quad (V)$$

Donde:

- L: Largo del vertedero [m]
- Q: Caudal [m³/s]
- g: Aceleración de gravedad [m/s²]
- H: Carga sobre el vertedero [m]
- C_c: Coeficiente de gasto (0,4) [-]

- Turbina Tipo Sifón

La implantación de una turbina Tipo Sifón se justifica si se considera la instalación de dos equipos que funcionen en paralelo. En esta disposición cada turbina funciona cargada de manera parcial (caudal menor que el máximo de diseño). Al considerar esta disposición se permite trabajar bajo un espectro más amplio de caudales, el cual incrementa al doble. En particular, dos turbinas conectadas en paralelo dan la capacidad de trabajar en las condiciones requeridas (6,2 [m³/s]).

Estos activos poseen una eficiencia de generación máxima de 0,75 [-] teniéndose así una potencia nominal de 176 [kW].

Haciendo provecho del vertedero lateral ya existente, se proyecta utilizar esta estructura como obra soportante para la implantación de estas turbinas, ver Figura 4-6. Esta disposición permite dejar una rama del canal libre. La disposición descrita permite generar un bypass que admite el flujo continuo de agua, aún cuando las turbinas estén fuera de operación.

La mayor utilización de espacio requerido para estos equipos viene fundada por la tubería que conecta el espejo de agua superior e inferior, entre los que se produce el desnivel necesario para la generación. Visto en planta, este espacio considera un rectángulo de 7 [m] de largo por 1,5 [m] de ancho

- Turbina de Vórtice Gravitacional

La elección de la turbina de Vórtice Gravitacional se explica al ser ésta capaz de producir con un salto hidráulico máximo de 4 [m], misma diferencia de cotas que tenemos en esta situación. Además, este activo admite la posibilidad de instalación en paralelo de las turbinas, ampliando así el rango de caudales para la aplicación éstos. Se tiene entonces que dos de estos aparatos conectados en paralelo permiten aprovechar todo el flujo disponible.

La turbina de Vórtice Gravitacional posee una eficiencia de generación de 0,84 [-] lo que se traduce en una potencia máxima aprovechable de 204 [kW]. Un inconveniente de éstas es que poseen una limitante en el generador, éste no produce más de 55[kW], así se tiene que solo es susceptible de aprovechamiento 110 [kW].

El contenedor de hormigón necesario para albergar los equipos electromecánicos de cada equipo tiene una forma cilíndrica de 4 [m] de diámetro.

La instalación de los equipos se proyecta en el canal que alberga actualmente el vertedero lateral, esto, producto de la necesidad de una superficie en planta capaz de alojar dos circunferencias de 4 metros de diámetro, aproximadamente 25 [m²]. La disposición de los equipos se puede ver en la Figura 4-7.

La limitante de 55 [kW] del generador, crea la necesidad de dejar el canal frontal como un canal de servicio, que esté en constante operación. Esto dado que se debe controlar el flujo admitido por los equipos.

- Turbina CrossFlow

Como se señala antes, la instalación de una turbina de Flujo Cruzado (Figura 4-8) requiere de obras distintas a los equipos ya mencionados, estas son: una cámara de carga que permita amortizar los cambios de flujo, una tubería en presión y una casa de máquinas diseñada para albergar los

equipos electromecánicos. Con el fin de conservar la infraestructura existente y generar la menor cantidad de intervención en el cauce, estas obras se implantan sobre las ya existentes.

El vertedero lateral, que permite devolver los excedentes al canal sin que estos pasen por la turbina y sean conducidos por la obra de excedencia (actual vertedero lateral), se calcula con la Fórmula (V) y da como resultado para éste un largo de 7 [m].

La potencia que permite inyectar esta turbina son 232 [kW]. Este aprovechamiento tan alto se lo debe a que es capaz de aprovechar todo el caudal y la caída disponible para la generación. Además de una elevada eficiencia de generación.

La instalación de la casa de máquinas se proyecta sobre el canal, omitiendo la necesidad de utilizar terrenos anexos al canal, esto supone una ventaja puesto que se desconoce el dominio de los suelos adyacentes al lugar de implantación. Esta idea debe ser validada con cálculos estructurales que faculten dicha configuración.

A su vez, la cañería en presión también se proyecta sobre el canal existente minimizando de esta forma la intervención del cauce al tener que producir desvíos de agua.

Se presentan a continuación los cuatro esquemas que corresponden a cada una de las máquinas e instalaciones ya identificadas. En éstos se puede apreciar la disposición de las obras descritas previamente para la disposición e implantación de cada equipo. Estos esquemas se diseñan con el objetivo de facilitar el entendimiento de los beneficios que supone utilizar infraestructura existente.



Figura 4-5: Esquema de implantación de una central de generación tipo Tornillo de Arquímedes; vista en planta y elevación

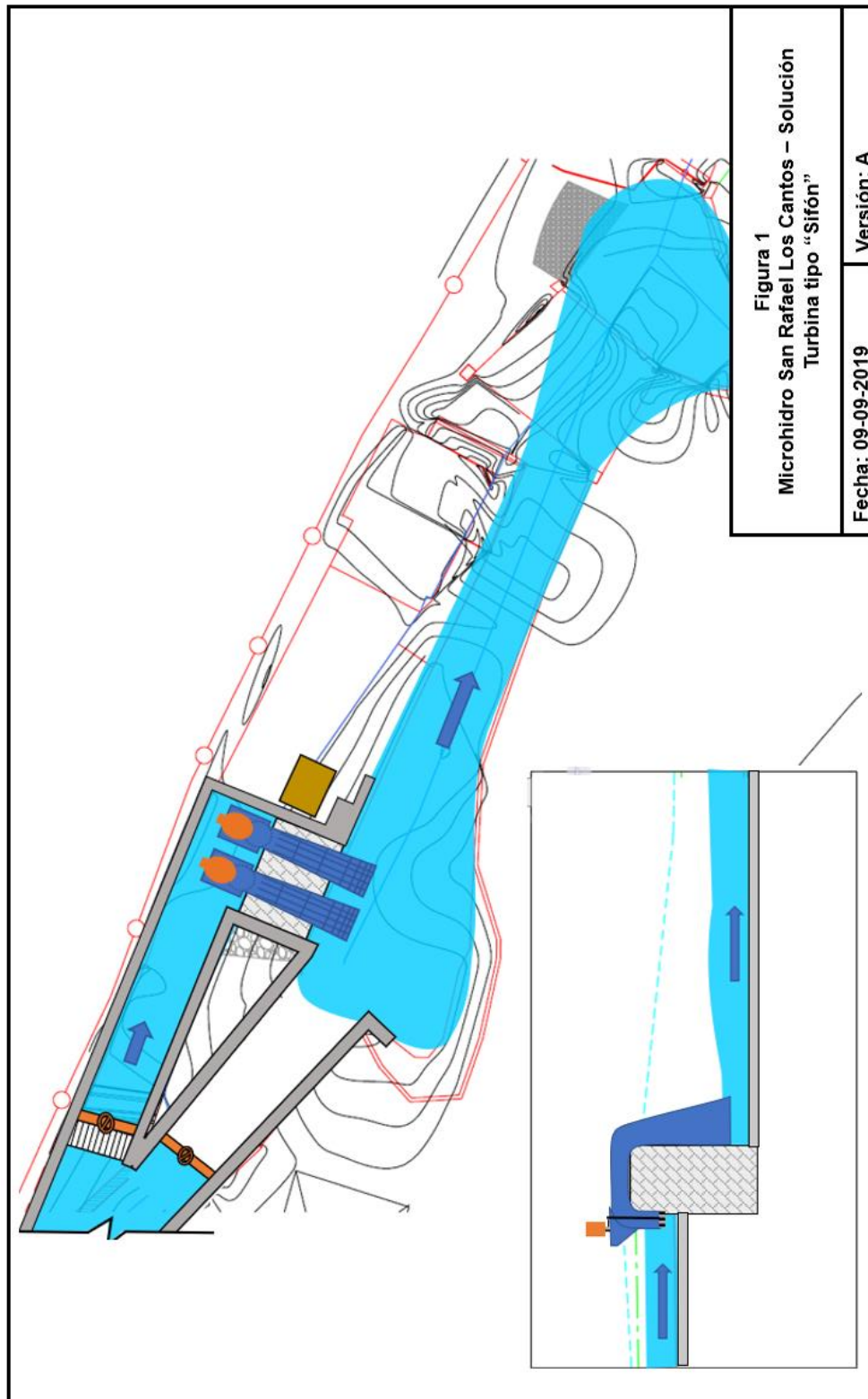


Figura 4-6: Esquema de implantación de una central de generación tipo "Sifón"; vista en planta y elevación

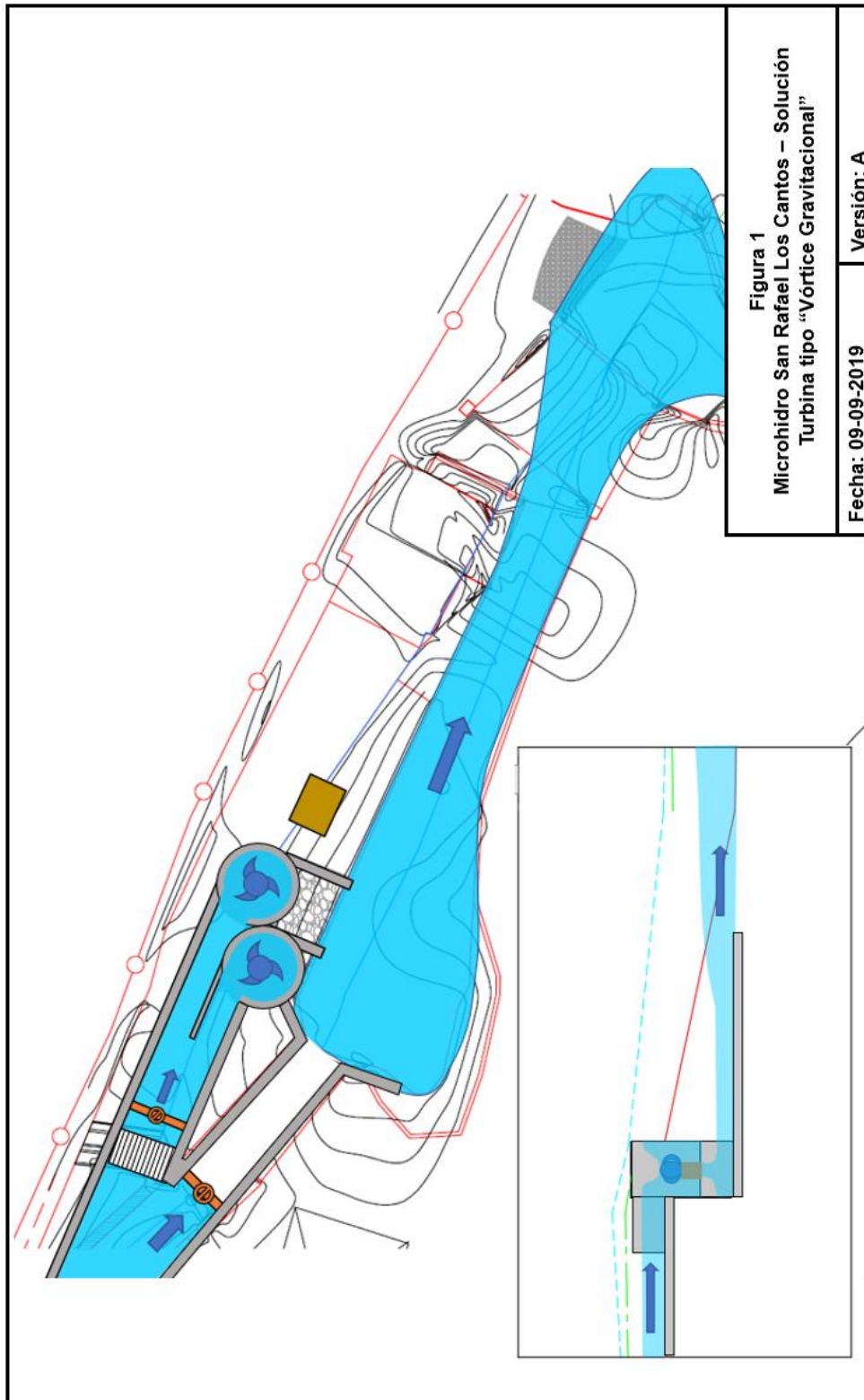


Figura 4-7: Esquema de implantación de una central de generación tipo "Vórtice";
 vista en planta y elevación

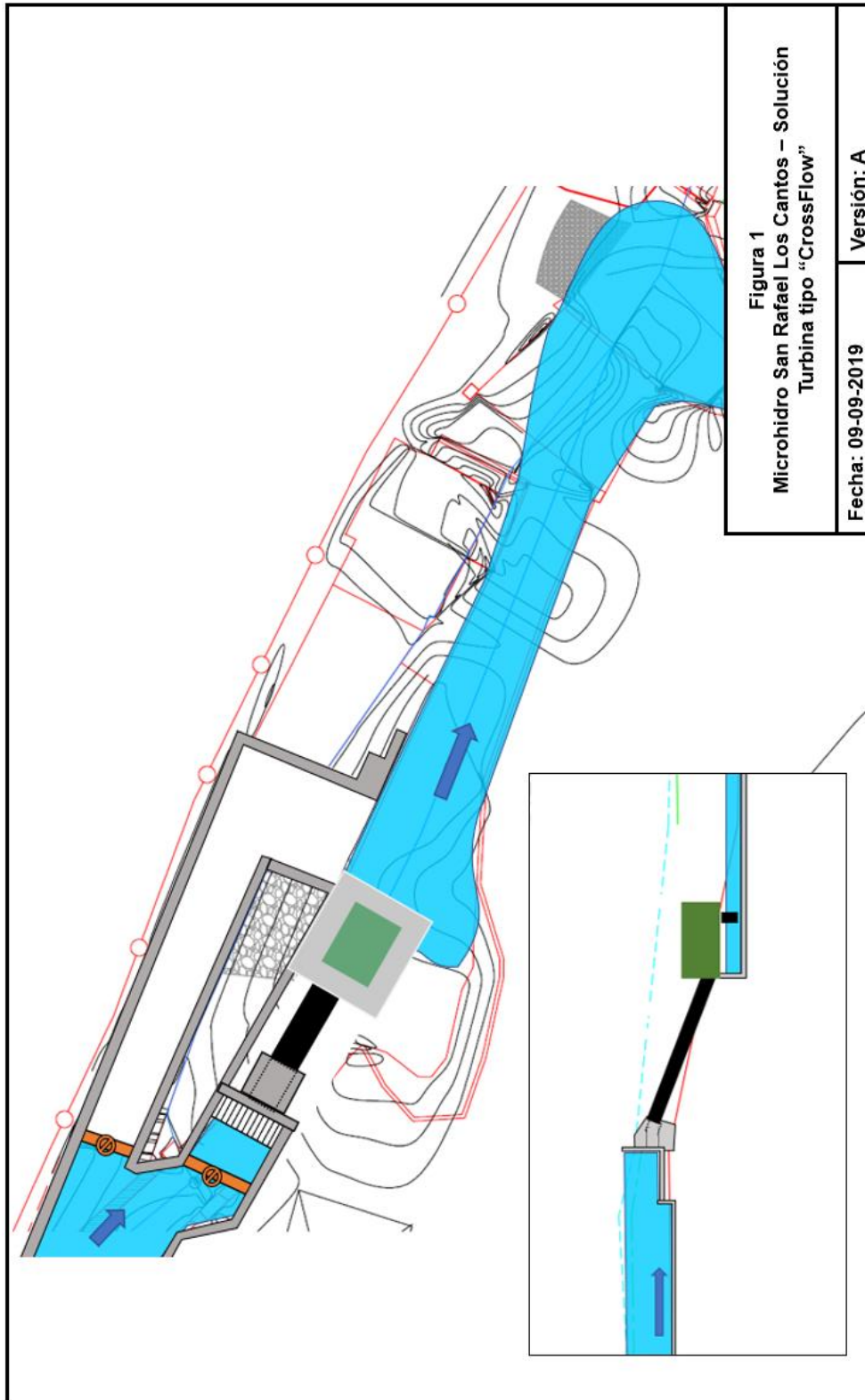


Figura 1
 Microhidro San Rafael Los Cantos – Solución
 Turbina tipo "CrossFlow"

Fecha: 09-09-2019 | Versión: A

Figura 4-8: Esquema de implantación de una central de generación tipo "CrossFlow";
 vista en planta y elevación.

4.1.3. Evaluación Económica

Como se revisa en el capítulo que antecede, la evaluación económica se constituye por tres ítems: Los costos de inversión, los ingresos producidos por el rédito que aporta la generación y los costos de mantención de los equipos y canales. Los últimos costos equivalen a una fracción de la inversión inicial (5%).

A continuación, se revisan los costos de inversión y los ingresos proyectados por concepto de la producción de energía según lo descrito en el Capítulo 3.

La inversión compuesta por las Obras Civiles y equipos electromecánicos se resumen en la Tabla 4-1: Resumen de costos Proyecto “Central San Rafael”. Se resume el costo Total por partida para las tecnologías indicadas.. Cabe señalar, que las obras preliminares y los caminos de acceso son equivalente para los cuatro equipos. Esto producto que se considera un camino de acceso de igual ancho (3 [m]) para los tres casos y otros insumos, como señalética, cercos perimetrales entre otros.

Tabla 4-1: Resumen de costos Proyecto “Central San Rafael”. Se resume el costo Total por partida para las tecnologías indicadas.

Resumen Presupuesto proyecto minicentral	Tornillo de Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
ÍTEM	Costo	Costo	Costo	Costo
OBRAS PRELIMINARES	\$ 7.374.319	\$ 7.374.319	\$ 7.374.319	\$ 7.374.319
CAMINO DE ACCESO	\$ 22.451.030	\$ 22.451.030	\$ 22.451.030	\$ 22.451.030
CASA DE MÁQUINAS	\$ 2.671.155	\$ 1.806.401	\$ 1.806.401	\$ 34.699.290
OBRAS CIVILES TUBERÍA	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1.628.329
OBRAS ELÉCTRICAS	\$ 15.151.307	\$ 15.151.307	\$ 15.151.307	\$ 15.151.307
REPARACIÓN DE CANAL	\$ 8.946.318	\$ 15.901.537	\$ 14.620.284	\$ 4.421.716
COSTOS DIRECTOS (OCC + ELECTRICIDAD)	\$ 56.594.128	\$ 62.684.594	\$ 61.403.341	\$ 85.725.991
UTILIDAD DEL CONTRATISTA (12%)	\$ 5.552.737	\$ 5.448.967	\$ 5.448.967	\$ 9.591.513
GASTOS GENERALES (5%)	\$ 2.313.641	\$ 2.270.403	\$ 2.270.403	\$ 3.996.464
IMPREVISTOS (3%)	\$ 1.388.184	\$ 1.362.242	\$ 1.362.242	\$ 2.397.878
SUBTOTAL COSTOS NETOS DE OBRA	\$ 55.527.373	\$ 54.489.668	\$ 54.489.668	\$ 95.915.130
SUBTOTAL EQUIPAMIENTO	\$ 413.673.224	\$ 216.240.876	\$ 210.728.876	\$ 292.603.156
IVA (19%)	\$ 89.148.113	\$ 51.438.803	\$ 50.391.523	\$ 73.818.474
SUBTOTAL COSTOS IVA INCLUIDO	\$ 558.348.709	\$ 322.169.348	\$ 315.610.068	\$ 462.336.760
ESTUDIOS Y PREPARACION (5%)	\$ 7.233.774	\$ 5.296.424	\$ 5.244.060	\$ 8.486.680
INSPECCION TECNICA (2%)	\$ 2.893.510	\$ 2.118.569	\$ 2.097.624	\$ 3.394.672
TOTAL, COSTOS (PESOS)	\$568.475.993	\$329.584.341	\$322.951.751	\$474.218.112

Tras un análisis de los costos dispuestos en la tabla anterior, se puede observar que el mayor peso en el costo total del Proyecto es acaparado por los equipos electromecánicos y en menor medida por las obras civiles, esta situación se hace más explícita al analizar los valores de la Tabla 4-2. En ésta se puede observar como, por ejemplo, en la turbina CrossFlow, el costo de las obras civiles se adjudica un 18% del presupuesto total y el equipo electromecánico un 62%, semejante a lo descrito en la literatura.

Tabla 4-2: Relación porcentual dada entre los costos por concepto de Obras Civiles y Equipamiento Electromecánico comparado con el costo total del Proyecto

	T. de Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
Costos de obra con relación al costo total	12%	19%	19%	18%
Costos de equipo electromecánico en relación con el costo total	73%	66%	65%	62%

Otro análisis necesario de hacer, es que, a pesar de que los tres primeros equipos electromecánicos tienen una menor cantidad de infraestructura asociada a su implantación, los mismos poseen un mayor valor asociado a la turbina como tal, compensando así la economización del Proyecto dada por la ventaja de no necesitar edificar nueva estructura.

- Ingresos asociados a la generación y venta de energía.

El interés que suscita la implantación de una Microcentral de Generación Hidroeléctrica viene dado por la posibilidad de obtener rédito del capital invertido. Una Forma de sacar provecho de la inversión, asociado a la normativa actualmente vigente en Chile, viene dada por la capacidad de autoconsumir la energía producida y amortizar los gastos de la cuenta eléctrica. Si la energía producida es mayor a la consumida, la energía pasa al sistema, el propietario del equipo de generación no recibe beneficios por esta inyección que realiza.

Pudiera el propietario de esta máquina obtener una retribución económica por el gasto acometido, al ser recompensado por la energía que inyecta. La venta de energía es el un posible ingreso que se considera en la evaluación económica.

La generación de una planta viene dada por la capacidad de producción que ésta tenga durante un año. La capacidad de generar, a su vez está subordinada a la disponibilidad del recurso hídrico, un análisis de la hidrología local permite obtener la cantidad de agua que circula en los canales.

El estudio de la disponibilidad del recurso hídrico se hace a través de registros históricos de mediciones directas en el punto donde se proyecta la implantación . En su defecto, se puede utilizar mediciones indirectas, en el sentido que se pueden tomar como referencia otras estaciones y extrapolar los resultados.

En este caso se utiliza la extrapolación de datos, la estación fluviométrica Chacabuquito mide los caudales en el río Aconcagua, se relacionan los datos históricos de esta con los Derechos de Aprovechamiento para determinar los caudales que circulan en los canales de riego alimentados por el Río.

El estudio más detallado se muestra en el Anexo B. Enseguida, se presenta en la Tabla 4-3, el resumen de los cálculos realizados para obtener el caudal medio mensual que circulan mes a mes a través del Canal Unificado San Rafael-Los Cantos.

Tabla 4-3: Caudales disponible “Central San Rafael”. Se muestran los caudales mes a mes cuya probabilidad de excedencia es 85 %

	Qmed [m³/s]
ENE	2,63
FEB	3,03
MAR	1,90
ABR	1,20
MAY	1,07
JUN	1,26
JUL	1,25
AGO	1,38
SEP	1,69
OCT	2,71
NOV	4,98
DIC	6,18

Se adjunta en la Tabla 4-4 la Potencia calculada según el promedio mensual de caudales. En la última fila de la Tabla se muestra el factor de planta que representa, como ya se sabe, un factor de utilización de ésta.

Tabla 4-4: Resumen de la energía media mensual, medida en [kW/h] y factor de planta de la generación en el Canal San Rafael - Los Cantos

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pmed	F.P
T.A	87,6	101,0	63,5	40,0	35,6	41,9	41,6	45,9	56,3	90,3	166,1	206,2	81,3	0,39
Sifón	77,3	88,3	56,0	35,3	31,4	37,0	36,7	40,5	49,7	79,7	146,5	176,6	71,3	0,40
Vórtice	65,4	89,1	54,7	35,3	31,4	37,0	36,7	40,5	49,7	79,7	109,5	109,5	61,5	0,56
CrossFlow	98,5	113,7	71,4	45,0	40,1	47,2	46,8	51,7	63,4	101,6	186,8	232,0	91,5	0,39

Se puede observar que para tres de los cuatro casos el factor de planta es 0,4 o muy cercano a éste, tal y como se revisa en la literatura . En el cuarto caso, de la turbina de Vórtice, esta fracción es mayor, pero la instalación tiene una potencia menor (110 [kW]) que las otras tres. Una forma de disminuir esta relación y acercarse a lo que en la bibliografía se señala es instalar un tercer equipo de Vórtice, así se obtiene un factor 0,42. Se debe considerar que la implantación de otro equipo aumenta los costos totales del Proyecto.

Como se entiende, el Factor de Planta es una medida de la energía producida en un año, y la energía la fuente de ingreso para este Proyecto. Con estos datos se realiza la evaluación económica que a continuación se resume (Tabla 4-5)

Para esta evaluación se estima un horizonte temporal del Proyecto a 10 años. Para la implantación de éste, la inversión la realiza un tercero, quien es, además, el beneficiado por las utilidades del Proyecto. El ejecutor al cabo del 4º año comienza a retribuir a los regantes por concepto de utilización de sus aguas. Todas estas condiciones son supuestos que se ratifican a través de los contratos del Proyecto que beneficie a los regantes, quienes tienen el recurso y a quien cuente con el capital para realizar la inversión inicial.

El análisis económico a través del indicador VAN se encuentra detallado en la sección de anexos.

Tabla 4-5: Resumen del Flujo de Caja para la central San Rafael

	Tornillo de Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
INGRESOS (\$)				
BONIFICACIÓN CNR	454.780.794	263.667.473	258.361.401	379.374.490
VENTA ENERGÍA	529.437.386	354.492.859	460.380.336	529.437.386
TOTAL INGRESOS	984.218.181	618.160.332	718.741.737	908.811.876
EGRESOS (\$)				
CAPEX	568.475.993	329.584.341	322.951.751	474.218.112
MANTENCIÓN	27.865.126	18.657.519	24.230.544	27.865.126
ADMINISTRACIÓN	55.730.251	37.315.038	48.461.088	55.730.251
SEGUROS	56.847.599	37.315.038	32.295.175	47.421.811
COSTO FINANCIERO	41.214.509	23.894.865	23.414.002	34.380.813
TOTAL EGRESOS	750.133.479	23.894.865	451.352.560	639.616.113
RESULTADO (\$)	234.084.702	175.750.135	267.389.177	269.195.763
PAGO A REGANTES (CONTRATO)	85.456.205	58.264.974	77.822.935	87.388.491
VAN	46.750.450	50.503.882	105.115.089	82.205.410

Al finalizar este análisis se concluye que la inversión que reporta mayor nivel de utilidades, medido a través del valor presente (VAN), es la turbina tipo Sifón, seguido de la turbina CrossFlow, para luego tener la turbina de Vórtice y en último lugar al Tornillo Hidráulico.

Como se observa hasta ahora y más adelante, el indicador económico VAN no es el único criterio que se puede utilizar. Esto aunque visto desde la perspectiva del inversionista pudiese ser considerado como un criterio decisivo a la hora de la toma de decisión. Lo anterior se debe a que un mayor Valor Presente, se traduce en una rentabilidad mayor del Proyecto.

4.1.4. Análisis Multivariable

Las variables por considerar en este análisis son seleccionadas por quien evalúa el Proyecto, así como también el factor de ponderación con respecto a la nota final. Los criterios tratan de darle objetividad a asuntos de apreciación, pero no se debe perder de vista esto último, los criterios de interés pueden cambiar de un evaluador a otro.

Para llevar a cabo el Análisis Multicriterio, en esta instancia se consideran seis variables, las dos señaladas como las más importantes: Disponibilidad de Servicio Técnico y Energía Producida por Costo de Inversión, se llevan un 50% de la evaluación total del Proyecto.

Otra variable que se considera reviste importancia en este Proyecto, es el lugar de emplazamiento, teniendo en cuenta que en la vecindad de la instalación se ubica un condominio (Figura 4-1), el equipo se encuentra a merced de terceros que pudieran interferir en el correcto funcionamiento de las máquinas.

Los Antecedentes de la Tecnología son siempre relevantes, ya que suponen un punto de comparación para el futuro Proyecto. En menor medida lo es la Adaptabilidad a las Condiciones Existentes puesto que la colocación de las obras para los cuatro casos se proyecta de forma que saquen provecho de las condiciones existentes.

Se presenta en la Tabla 4-6: Análisis de Criterio Multivariable. En esta se puede observar las notas y la relevancia de éstas al momento de obtener una calificación final para el proyecto., la ponderación y las calificaciones asignadas para elaborar el análisis multicriterio del proyecto San Rafael- Los Cantos

Tabla 4-6: Análisis de Criterio Multivariable. En esta se puede observar las notas y la relevancia de éstas al momento de obtener una calificación final para el proyecto.

		[%]	T. de Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
1	Disponibilidad de servicio técnico	25	7	5	5	7
2	Costos por Energía [kwh/\$]	25	3.5	3.0	6.5	5.4
3	Adaptabilidad a las condiciones existentes	10	5	5	5	5
4	Modularidad	5	1	5	6.5	3
5	Contexto social del lugar de emplazamiento	20	3	5	4	7
6	Tecnología probada en Chile	15	5	4	2	7

Total	100	4.5	4.4	4.8	6.2
--------------	-----	-----	-----	-----	-----

Se tiene entonces, que las alternativas ordenadas de mayor a menor interés, según este criterio, corresponden a: la turbina CrossFlow, seguido muy por debajo por la turbina tipo Sifón, en tercer lugar el Tornillo Hidráulico y en último lugar, casi con igual calificación el equipo de Vórtice.

La ventaja de la CrossFlow radica principalmente en que es una tecnología probada en Chile, por lo mismo dispone de un servicio técnico de vasta experiencia. A su vez, la turbina de Flujo Cruzado es capaz de utilizar todo el potencial disponible. En este caso, la escasa modularidad de este equipo no resulta ser tan ponderante como sí lo son las otras variables, donde este activo es superior.

4.2. Canal Unificado Hurtado-Ramírez-Salero

Aún en el contexto del proyecto: “*Unificación de Bocatomas Primera Sección del Río Aconcagua, Región de Valparaíso*”, se propone como una de las alternativas de solución en dicho proyecto la unificación de los canales Hurtado y Salero a través de un trasvasije de aguas desde el primero.

La propuesta antes mencionada crea un potencial de generación susceptible de ser aprovechado. En aquel proyecto se plantea la unificación de los canales Hurtado-Ramírez- Salero (Figura 4-9), para ésto se propone que el primer canal (Hurtado) funcione como canal matricial y conduzca el flujo de los tres canales actualmente existentes, desde la Bocatoma del Canal Hurtado hasta un trasvasije que permita desviar las aguas hacia los otros dos. La unión se realiza a través de un tramo que permite llevar las aguas desde una cota superior hasta uno que se encuentre en una elevación menor; en este caso desde el canal Hurtado hacia el Canal Salero, separados por un desnivel de aproximadamente 20 [m].

Actualmente, el canal Hurtado se aproxima a dicha descarga a través de una sección trapecial con 3 [m] de ancho, un talud con relación 2:3 (H: V) y una altura máxima de 3 [m] desde el fondo. El trasvasije se hace a utilizando una grada lateral de control con un alto de 1,1 [m] sobre el nivel de fondo, para conducir las aguas hacia la caída dentada.

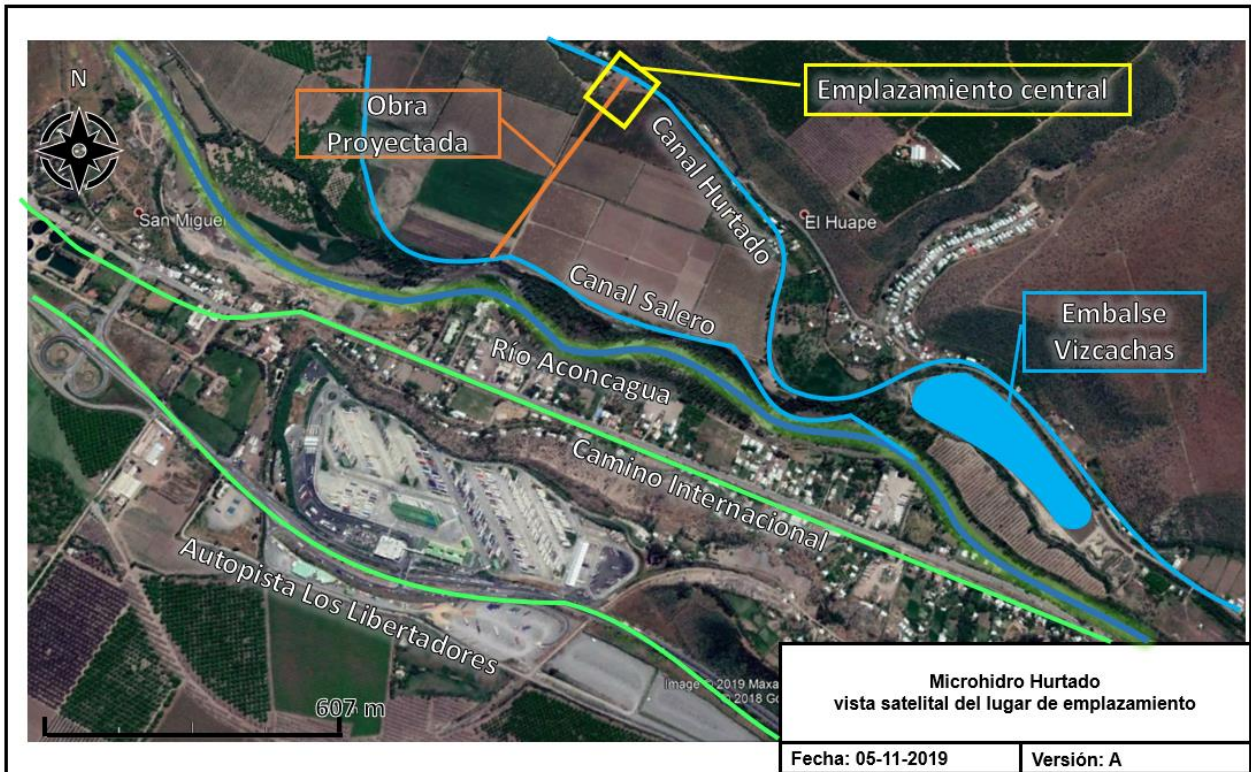


Figura 4-9: Vista satelital del lugar de emplazamiento Microcentral Hurtado. Proyecto de generación hidroeléctrica

En la primera sección de esta obra, se produce una desnivel de 10 [m] desarrollados en una extensión de 20 [m], produciendo una caída abrupta. Ésta se logra salvar mediante una caída dentada y un dissipador de energía; se puede ver esta situación en la Figura 4-10: Vista del perfil topográfico del desnivel proyectado para generar el trasvase del Canal Hurtado, que corresponde a un perfil topográfico. A demás en esta Figura se muestran las obras proyectadas.

El desnivel es salvado a partir de un tramo con una caída dentada, le sigue estanque de disipación, para continuar con un tramo en pendiente de 0,05 %. La proyección de la turbina se plantea en la primera sección correspondiente a la caída dentada, haciendo provecho del desnivel existente en esta zona.

En este canal circula un caudal máximo de 20,7 [m³/s]. Lo anterior, sumado a los 10 [m] de caída disponible, se traduce en un aprovechamiento bruto solo en la sección del canal en estudio, de aproximadamente 2000 [kW], muy por sobre el alcance de este trabajo, centrado en potencias instaladas menores o iguales a 300 [kW].

Sin embargo, se pueden utilizar fracciones de dicho caudal o de la caída señalada haciendo compatible la generación de 300 [kW] y poder hacerse acreedor de los beneficios de la Ley del Net Billing. En ese sentido, se utilizan los mismos equipos esgrimidos en el caso anterior con el propósito de hacer un análisis similar en ambos casos que permita hacer comparación entre éstos.

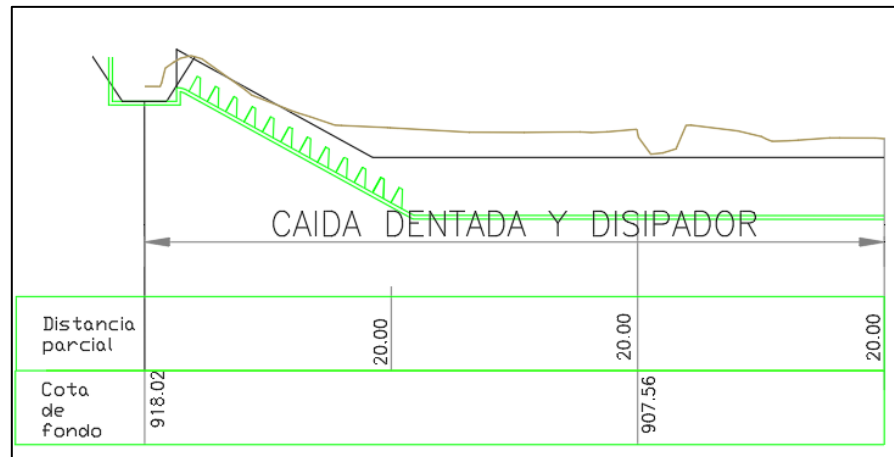


Figura 4-10: Vista del perfil topográfico del desnivel proyectado para generar el trasvasije del Canal Hurtado

4.2.1. Elección de turbinas

La elección de las turbinas a partir de ábaco se ha omitido de forma intencional, ésto se debe a la decision de utilizar los mismos equipos del caso Canal Unificado San Rafael-Los Cantos, y así poder tener puntos de comparación entre éstos. Además, como se revisa en esa misma sección, las turbinas Tornillo de Arquímedes, tipo Sifón, de Vórtice Gravitacional y CrossFlow representan tecnologías innovadoras, de interés para este trabajo.

Por lo mismo, en las secciones que suceden a ésta, se fuerzan las condiciones para poder utilizar cualquiera de los cuatro equipos ya mencionados, lo que es factible gracias a la holgura de recursos existente, ya que el potencial de generación de la zona son 2 [MW].

4.2.2. Disposición para la implantación de las turbinas

La diferencia de nivel entre la cota de fondo del canal y la del dissipador se cifra en 10,46 [m]. Como el potencial de la zona es mayor a lo permitido para optar a las garantías otorgadas por la Ley del Net Billing, se puede operar la turbina con fracciones del caudal si se conserva la caída. Se fija esta altura, y de la Ecuación (I) se despeja el caudal, obteniendo el flujo necesario para obtener la potencia de 300 [kW].

Al fijar la potencia generada, se obtiene un número de unidades necesarias para cumplir con la potencia máxima permitida por la Ley, esta situación es análoga para las turbinas de Vórtice y Sifón. Para cada tipo de turbina la cantidad de máquinas se compatibiliza con las condiciones disponibles en terreno, teniendo en consideración la posibilidad de instalar estos equipos tanto en serie como en paralelo.

Los equipos en serie permiten aprovechar mejor el nivel, mientras que la disposición de éstos en paralelo, permite ampliar el rango de caudales admisible por las turbinas al dejar que el flujo sea turbinado por más de un equipo.

- Turbina Tornillo de Arquímedes y CrossFlow

El Tornillo Hidráulico (Figura 4-11) y la turbina CrossFlow (Figura 4-14) funcionan en el rango de caída señalada, por lo que no tienen necesidad de instalación de máquinas en serie, así solo se necesita uno de éstos para salvar el desnivel de 10,46 [m].

El Tornillo de Arquímedes funciona así bajo condiciones de caudal de 3,29 [m³/s], mismo flujo para una turbina CrossFlow, ya que poseen eficiencias similares.

Se debe considerar la construcción de un vertedero lateral, obra de excedencia que permite verter las aguas ante el cierre de las compuertas de admisión de las turbinas. Dicha Obra se calcula con la Fórmula (V) y una carga admisible de 0,25 [m]. La edificación de éste se proyecta paralela a los muros del canal.

- Turbina de Vórtice Gravitacional

Caso aparte al anterior es el de la turbina de Vórtice (Figura 4-12) cuya potencia máxima de generación son 55 [kW], esto implica la necesidad de implantar 5 activos para no exceder el límite establecido por la Ley del Net Billing, dando esta condición un requerimiento total de 5 turbinas, permitiendo generar 275 [kW]. Puede considerarse una 6^{ta} que opere a media carga, pero esto no es provechoso en términos económicos.

La Caída máxima que se puede salvar con este equipo son 4 [m] admitiendo la posibilidad de instalar dos turbinas en paralelo, composición que permite utilizar 8 de los 10 [m] disponibles, entonces, ubicando dos turbinas más con la misma configuración (en serie), paralelas a la existente y la restante en paralelo a las demás se, totalizan 5 equipos, dicho en otras palabras, tenemos desde aguas arriba hacia aguas abajo, una primera fila compuesta de 3 turbinas conectadas en paralelo, seguido de una fila de 2 unidades. Esta configuración queda explicada a través del esquema que se muestra en la Figura 4-12. Al tener tres turbinas conectadas en paralelo en la primera fila, capaces de admitir 1,7 [m³/s] cada una, se necesita desviar un total de 5,1 [m³/s].

- Turbina Tipo Sifón

Un razonamiento similar a las turbinas de Vórtice se hace con las de tipo Sifón. Estas últimas tienen un máximo de generación de 100 [kW] de potencia, lo que se traduce en la necesidad de 3 equipos; con la necesidad de utilizar 5 [m] de caída para cada uno se pueden esgrimir 2 máquinas en serie y una paralela a éstas, es decir, en la primera fila se tienen dos turbinas en serie y aguas debajo solo un equipo (Figura 4-13). El caudal utilizado por cada uno de estos equipos son 3 [m³/s], al utilizarse 2 activos conectados en paralelo se necesita desviar 6 [m³/s].

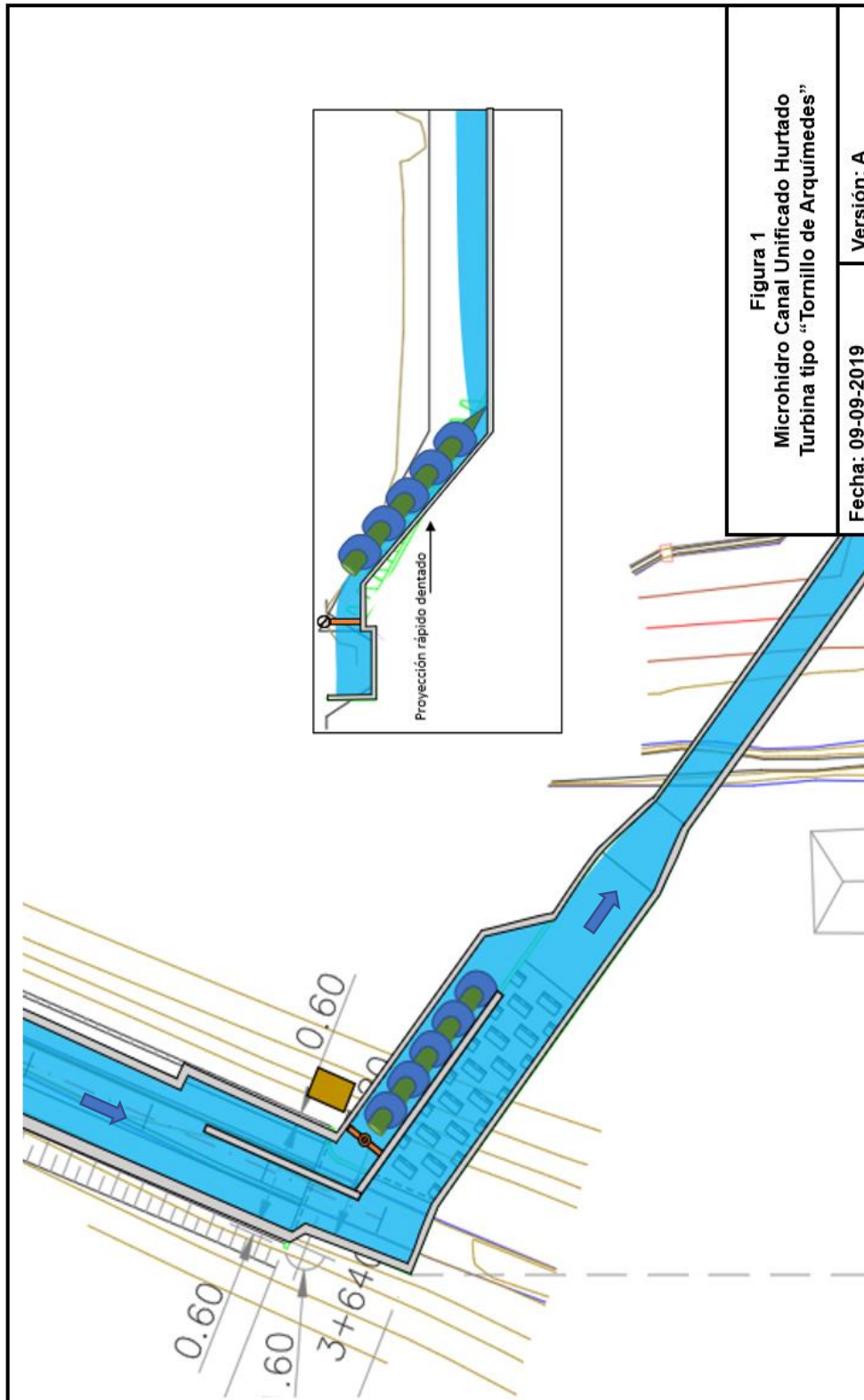


Figura 4-11 Esquema de implantación de una central de generación tipo "Tornillo de Arquímedes", vista en planta y elevación

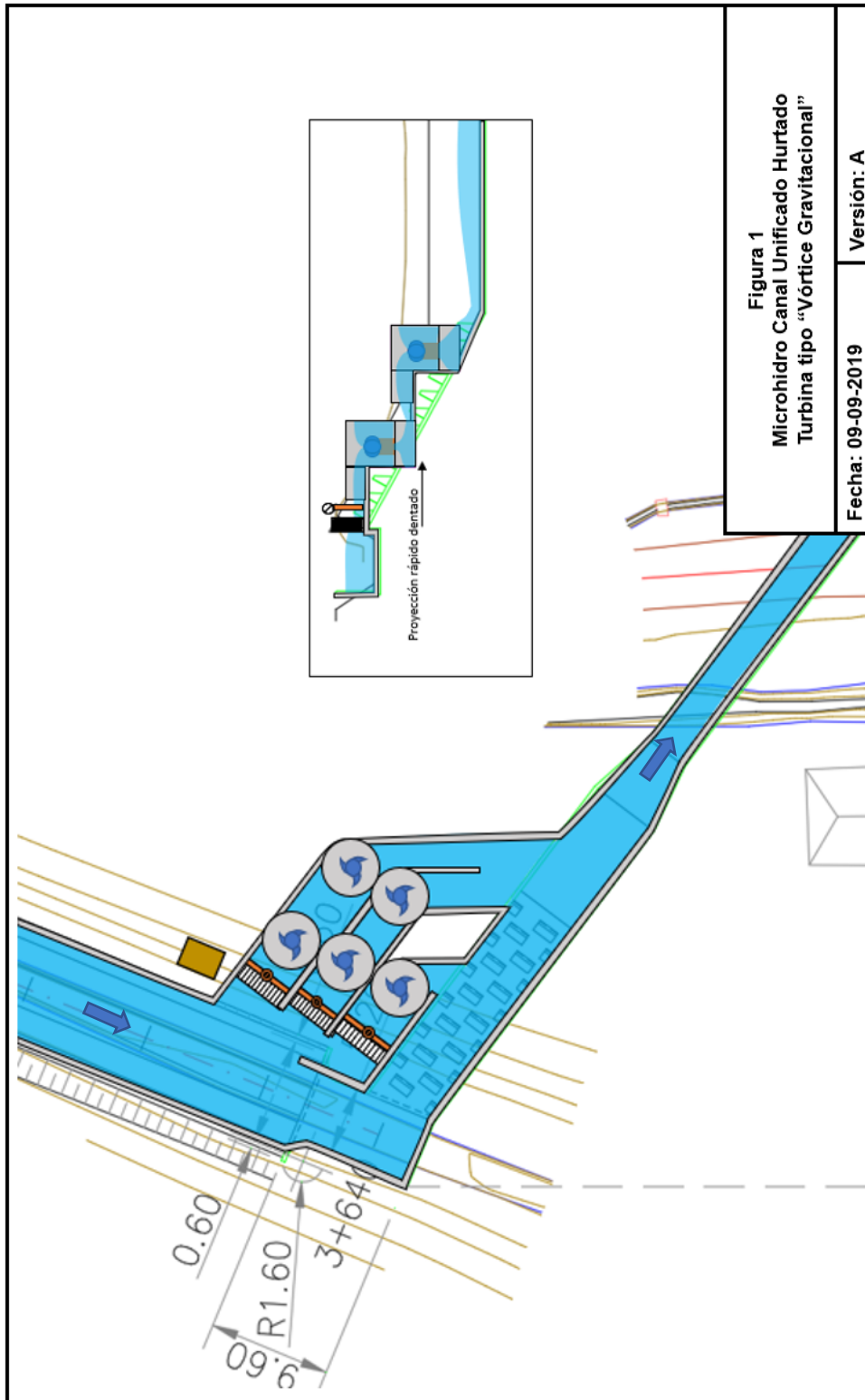


Figura 4-12: Esquema de implantación de una central de generación tipo "Vórtice"; vista en planta y elevación

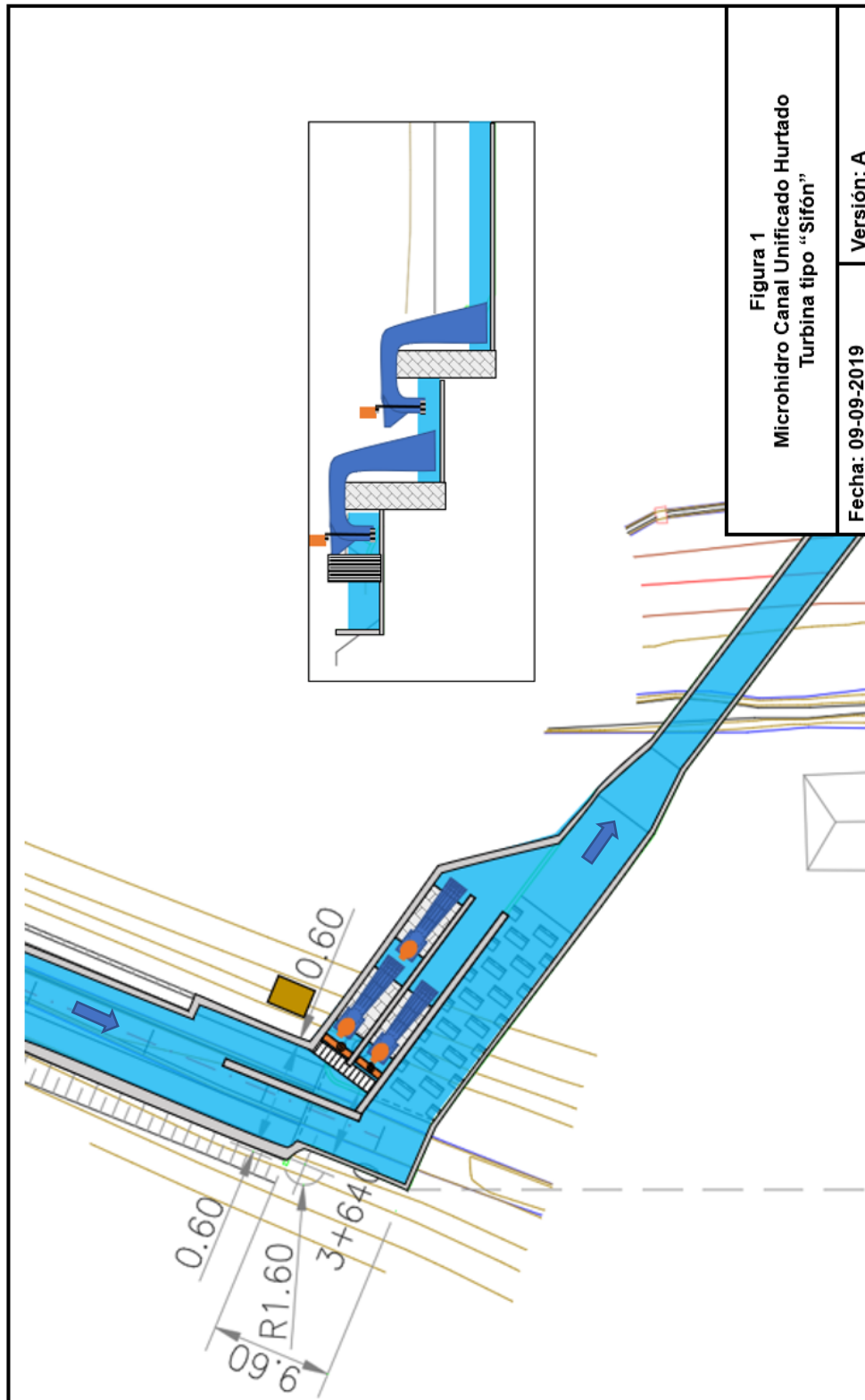


Figura 4-13: Esquema de implantación de una central de generación tipo "Sifón";
 vista en planta y elevación

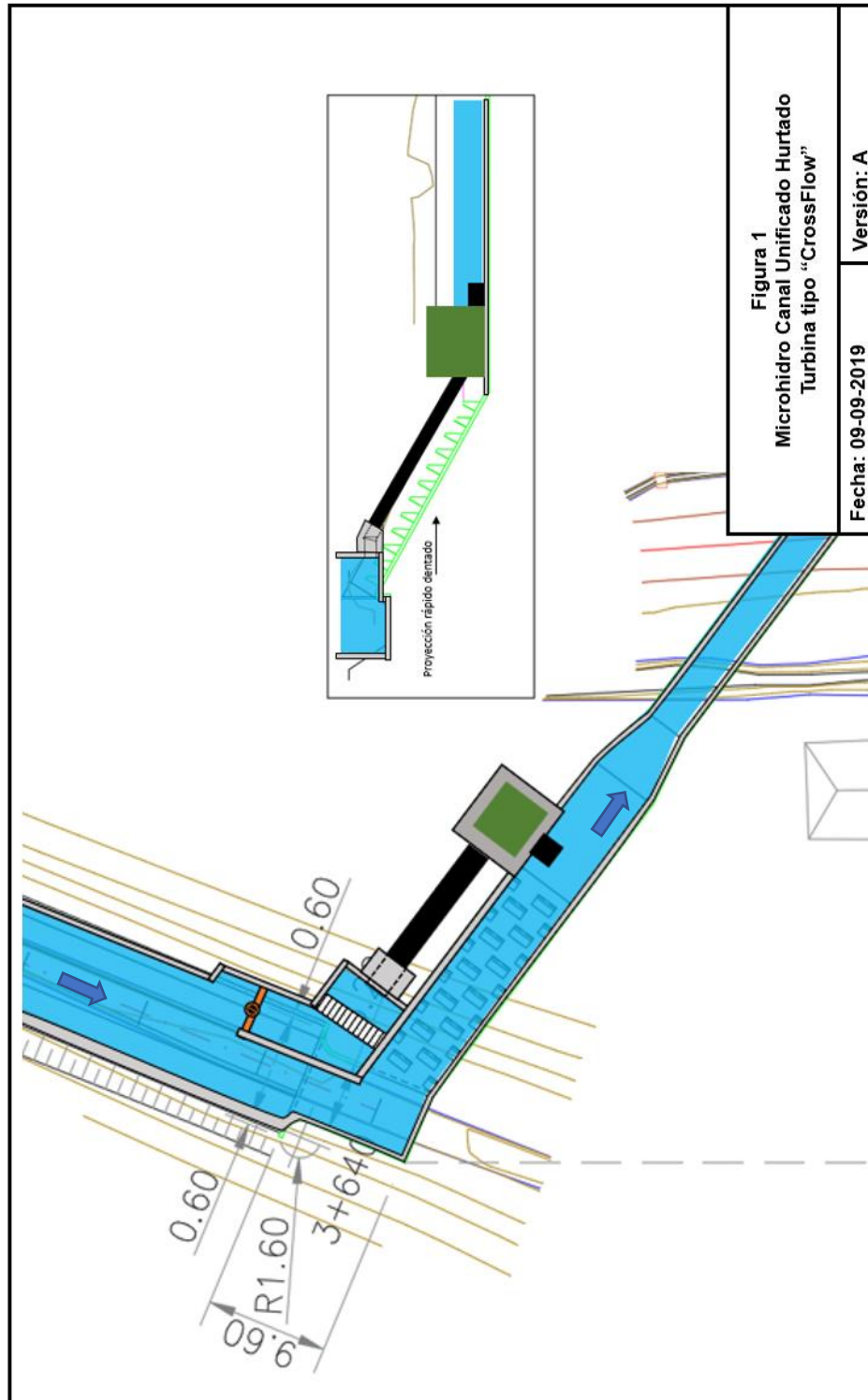


Figura 4-14: Esquema de implantación de una central de generación tipo "CrossFlow"; vista en planta y elevación

4.2.3. Evaluación Económica

Utilizando el mismo razonamiento que en el caso anterior, se elabora el Flujo de Caja para obtener la evaluación económica que implica la Implantación de una turbina Tornillo de Arquímedes, una de Vórtice, una de tipo Sifón y una CrossFlow. La evaluación económica se compone fundamentalmente de la inversión, los ingresos a su vez, se perciben por concepto de una eventual venta de la energía. Por otro lado la estructura de costos requiere considerar un egreso relacionado con la mantención.

La inversión viene dada a su vez por costos directos e indirectos para la implantación de la obra, estudios e informes y las obras propias del Proyecto.

A continuación, se presenta en la Tabla 4-7: Resumen de costos del Proyecto “Central Hurtado el resumen de costos para las distintas partidas que componen la implantación de las cuatro Tecnología de Microgeneración seleccionadas. En ésta se puede, además, comparar los costos de los distintos ítems necesarios para la institución de las turbinas. De esta manera, se puede contrastar uno a uno los valores.

Tabla 4-7: Resumen de costos del Proyecto “Central Hurtado”. Se resume el costo Total por partida para las tecnologías indicadas.

Resumen Presupuesto proyecto minicentral	Tornillo de Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
ÍTEM	Costo	Costo	Costo	Costo
OBRAS PRELIMINARES	\$ 7.374.319	\$ 7.374.319	\$ 7.374.319	\$ 7.374.319
CAMINO DE ACCESO	\$ 2.245.103	\$ 2.245.103	\$ 2.245.103	\$ 2.245.103
CASA DE MÁQUINAS	\$ 4.724.945	\$ 3.752.097	\$ 2.671.155	\$ 34.871.418
OBRAS CIVILES TUBERÍA	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 2.881.675
OBRAS ELÉCTRICAS	\$ 15.151.307	\$ 15.151.307	\$ 15.151.307	\$ 15.151.307
REPARACIÓN DE CANAL	\$ 5.170.275	\$ 15.901.537	\$ 38.249.375	\$ 3.760.998
COSTOS DIRECTOS (OCC + ELECTRICIDAD)	\$ 34.665.948	\$ 44.424.363	\$ 65.691.258	\$ 66.284.820
UTILIDAD DEL CONTRATISTA (12%)	\$ 3.374.481	\$ 3.257.739	\$ 3.128.026	\$ 7.337.859
GASTOS GENERALES (5%)	\$ 1.406.034	\$ 1.357.391	\$ 1.303.344	\$ 3.057.441
IMPREVISTOS (3%)	\$ 843.620	\$ 814.435	\$ 782.007	\$ 1.834.465
SUBTOTAL COSTOS NETOS DE OBRA	\$ 33.744.808	\$ 32.577.391	\$ 31.280.260	\$ 73.378.587
SUBTOTAL EQUIPAMIENTO	\$ 533.667.136	\$ 582.788.876	\$ 314.078.876	\$ 383.218.468
IVA (19%)	\$ 107.808.269	\$ 116.919.591	\$ 65.618.236	\$ 86.753.440
SUBTOTAL COSTOS IVA INCLUIDO	\$ 675.220.213	\$ 732.285.857	\$ 410.977.372	\$ 543.350.495
ESTUDIOS Y PREPARACION (5%)	\$ 7.077.654	\$ 7.474.849	\$ 4.844.925	\$ 8.006.601

INSPECCION TECNICA (2%)	\$ 2.831.062	\$ 2.989.940	\$ 1.937.970	\$ 3.202.641
TOTAL COSTOS (PESOS)	\$685.128.929	\$742.750.646	\$417.760.267	\$554.559.737

De acuerdo con los valores obtenidos en la Tabla 4-7, se puede relacionar la fracción del costo total que se encuentra compuesta por las Obras Civiles y el Equipo Electromecánico. Esta información se presenta en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Relación porcentual dada entre los costos por concepto de Obras Civiles y Equipamiento Electromecánico comparado con el costo total del Proyecto

	Tornillo de Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
Costos de obra con relación al costo total	7%	6%	16%	12%
Costos de equipo electromecánico en relación con el costo total	78%	78%	75%	69%

- Ingresos asociados a la generación y venta de energía.

Como se enuncia para el proyecto Canal Unificado San Rafael-Los Cantos, la fuente de ingresos permitida por ley para un equipo de microgeneración viene dada por la capacidad de autoconsumo de la energía producida. Éstos son ingresos indirectos, dicho de otra manera, la existencia de un equipo que permita abastecer de suficiente energía a su dueño da la posibilidad de prescindir del pago de cuenta a una empresa generadora.

Una posibilidad de obtener ingresos y la que a continuación se estudia, es dada por la eventual venta de la energía producida. La capacidad de generar a su vez viene supeditada por la disponibilidad de agua.

El análisis hidrológico se encuentra disponible en el Anexo B. Para realiza éste, se utiliza el registro del caudal medido en el río Aconcagua, aforado en la estación Chacabuquito, este dato se extrapola a través de los Derechos de Aprovechamiento que tiene potestad el Canal Hurtado en su sección inicial con el propósito de estimar el caudal medio que circula por el Canal de Riego.

En la Tabla 4-9 se muestran los caudales medios en el afluente a la Central, estos números resumen el cálculo antes descrito.

Tabla 4-9: Caudales disponibles “Central Hurtado”. Se muestran los caudales mes a mes cuya probabilidad de excedencia es 85 %.

	Qmed [m³/s]
ENE	9,06
FEB	10,44
MAR	6,56
ABR	4,13
MAY	3,68
JUN	4,33
JUL	4,30
AGO	4,75
SEP	5,82
OCT	9,34
NOV	17,17
DIC	21,32

Con los caudales obtenidos se realiza el cálculo de la energía real que la central es capaz de producir, para posteriormente obtener el Factor de Planta para este aprovechamiento. En la Tabla 4-10 se muestra la Energía que mes a mes es capaz de producir cada equipo. En la última columna se exhibe el coeficiente de producción de la planta.

Tabla 4-10: Resumen de la energía media mensual en [kW/h] y factor de planta de la generación en la Central Hurtado

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	P med	F.P
T. A	299	299	299	299	299	299	299	299	299	299	299	299	299	1
Sifón	299	299	299	252	235	259	258	274	299	299	299	299	281	1
Vórtice	110	109	109	109	108	109	109	109	109	109	109	109	109	1
CrossFlow	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	1

Se hace necesario recordar en este punto que la capacidad total del aprovechamiento, considerando toda la caída y el máximo caudal disponible son 2000 [kW], lo que significa casi siete veces más que la potencia del aprovechamiento que se proyecta. O sea, se utiliza solo una porción del real potencial. Esto se refleja en el Factor de Planta obtenido, donde la cifra permite inferir que las máquinas trabajarán a plena capacidad todo el año.

El Factor de Planta derivado se aleja de lo que la bibliografía establece como valores típicos para una instalación de estas características, tenemos un indicador 1 cuando debería estar en torno a 0,4-0,5; tener este indicador cercano a la unidad, revela que las obras están subestimadas, vale decir, la forma con la que se hicieron los cálculos, deja un potencial en desmedro al permitir que una porción del flujo que se puede turbinar no se hace. Recordemos que para calcular el flujo admisible por la Central se hizo fijando la altura, así se toma el flujo necesario para generar 300 [kW/h] y el restante se deja fluir libremente.

Se deben realizar estudios económicos más exhaustivos que permitan establecer si es recomendable dejar el Factor de Planta así o disminuirlo. Es necesario precisar en este punto que para disminuir dicho número se deben aumentar las dimensiones de la Central y sus obras. Es importante considerar que esto requiere una inversión mayor, pero a su vez, la planta tendrá una capacidad de generación más alta, por lo mismo mayor ingreso.

Para efectos de este trabajo y tener puntos de comparación con el caso anterior se desestima el Factor de Planta calculado, en su lugar se trabaja con los mismos valores obtenidos para el Proyecto anterior (Tabla 4-4). Además, esos valores son señalados por la literatura como óptimos para este tipo de aprovechamientos.

Con estos datos se elabora el Flujo de Caja que se resume en la Tabla 4-11. En ésta se sintetizan la información obtenida utilizando los mismos supuesto que en el Proyecto anterior; la valoración del éste se ejecuta con un horizonte temporal de 10 años. Aquí, es un tercero quien realiza la inversión inicial y retribuye a los regantes por utilizar sus recursos, al cabo del 4^{to} año quien invierte comienza a realizar este pago en base a las utilidades que el Proyecto reporta.

Bajo el criterio del valor presente neto (VAN) se pueden jerarquizar las alternativas, ordenándolas de mayor a menor interés, los proyectos son; turbinas Sifón, turbina de Vórtice, CrossFlow y finalmente el Tornillo Hidráulico. Esto significa un orden levemente distinto al caso anterior donde las alternativas dos y tres se encuentran invertidas.

Tabla 4-11: Resumen del Flujo de Caja para la central Hurtado

	Tornillo de Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
INGRESOS (\$)				
BONIFICACIÓN CNR	548.103.143	594.200.517	334.208.214	443.647.790
VENTA ENERGÍA	690.570.504	886.232.147	690.570.504	690.570.504
TOTAL INGRESOS	1.238.673.647	1.480.432.664	1.024.778.718	1.134.218.294
EGRESOS (\$)				
CAPEX	685.128.929	742.750.646	417.760.267	554.559.737
MANTENCIÓN	36.345.816	46.643.797	36.345.816	36.345.816
ADMINISTRACIÓN	72.691.632	93.287.594	72.691.632	72.691.632
SEGUROS	68.512.893	74.275.065	41.776.027	55.455.974
COSTO FINANCIERO	49.671.847	53.849.422	30.287.619	40.205.581
TOTAL EGRESOS	912.351.117	1.010.806.524	598.861.361	759.258.740
RESULTADO (\$)	326.322.530	469.626.140	425.917.357	374.959.554
PAGO A REGANTES (CONTRATO)	112.620.026	147.327.245	118.101.083	115.296.694
VAN	82.179.140	156.806.803	182.749.461	131.292.546

4.2.4. Análisis Multivariable

Se conservan algunos ponderadores utilizados en la evaluación realizada para la Central San Rafael, por ser considerados aplicables bajo los mismos términos en ambos casos. Otros en tanto, se modifican, este es el caso del criterio Contexto Social del Lugar de Emplazamiento y los Antecedentes de la Tecnología.

El indicador Contexto social resta importancia para esta evaluación, ya que la Central Hurtado se encuentra en un lugar aislado, lejos de lugares poblados, no revistiendo mayores peligros para los equipos.

Los antecedentes de la tecnología en esta oportunidad reciben una importancia más significativa dentro de la nota final, ya que al quedar aislada la turbina, se necesita tener seguridad de que ésta

opere de forma autónoma por largos períodos, para lo cual se requiere un respaldo que dé garantías de tal funcionamiento.

Se le otorga mayor importancia a la Modularidad de los Equipos, ya que en esta ocasión se pueden instalar muchos equipos de un mismo tipo. La modularidad supone un beneficio ya que permite, en caso de ser necesario, cambiar un equipo de forma fácil en un lugar aislado como el emplazamiento proyectado.

En la Tabla 4-12 se muestra la evaluación realizada para este Proyecto.

Tabla 4-12 Análisis de Criterio Multivariable. En ésta se puede observar las notas y la relevancia de las mismas al momento de obtener una calificación final para el Proyecto.

	[%]	T Arquímedes	Vórtice	Sifón	CrossFlow
Disponibilidad de servicio técnico	25	7	5	5	7
Costos por Energía [kWh/\$]	25	4.3	3.0	7.0	5.6
Adaptabilidad a las condiciones existentes	15	5	5	5	5
Tecnología probada en Chile	15	5	4	2	7
Contexto social del lugar de emplazamiento	10	3	5	4	7
Modularidad	10	4	5	6	3
Total	100	5.0	4.4	5.1	6.0

Según este análisis, la turbina CrossFlow vuelve a ser la más idónea para las condiciones evaluadas. Seguida de la turbina tipo Sifón, muy castigada por ser una tecnología aún no probada en el territorio nacional, lo que se ve reflejado también en la carencia de un servicio técnico apto para sus requerimientos.

El Tornillo hidráulico sigue muy de cerca, mostrándose como una alternativa interesante, castigada principalmente por la relación entre la energía capaz de producir y su elevado costo de construcción.

Relegada al último lugar, nuevamente queda la turbina de Vórtice, al ser una tecnología poco probada y con costos de construcción muy elevados.

4.3. Conclusiones del capítulo

Tras la aplicación de los criterios a dos casos se puede apreciar las bondades y dificultades de cada uno. Se permite valorar, en particular, la facilidad de elegir un equipo de generación puramente basado en su salto y caudal disponibles, pero dejando muchas otras variables relevantes fuera de la elección, lo que supone de manera intrínseca una dificultad.

Al contrastar los datos obtenidos en las Tabla 4-2 y Tabla 4-8, la relación porcentual de las distintas partidas con respecto al costo total, se corroborar que los valores entregados en la Tabla 3-2 son buenos parámetros de referencia para estimar los costos de un proyecto en fases temprana de la ejecución de éste.

En sintonía con lo anterior, se observa que utilizar valores unitarios para estimar los costos de un equipo electromecánico supone un error en sí mismo, ya que esta proporción no es directa y debería ser una relación potencial decreciente. Esto se infiere al observar que una mayor potencia instalada se traduce, en este caso, en un porcentaje mayor en el ítem que relaciona el equipo electromecánico contrastado con el precio total del Proyecto; en oposición a lo que señala la bibliografía que establece que el costo de la potencia instalada de la turbina representa una fracción bien acotada del costo del proyecto.

Una conclusión que salta fácilmente a la vista es que la turbina CrossFlow se eleva como el equipo que se adecúa de mejor manera a ambos casos, de aquí se desprenderse su fama, que la posiciona a nivel local como el equipo con mayor número de instalaciones de microgeneración en Chile (Gho Barba J. , 2016).

La turbina de Tipo Sifón, se presenta como la segunda alternativa más atractiva en ambos casos asociado principalmente a sus menores costos. El problema de esta, radica en que resulta desvalorizada en el Análisis Multicriterio debido a ser un equipo que queda a merced de las condiciones ambientales de su entorno, siendo vulnerable al no contar con una casa de máquinas y no estar probada en Chile. Ambas dificultades son sorteables; a pesar de no ser necesario, se puede conferir una estructura que brinde protección a los equipos y si se potencia la utilización de esta tecnología se elevará ésta como una alternativa igualmente competitiva con la turbina CrossFlow.

Pasando a otro punto, se hace necesario notar que los costos de inversión entre un equipo y otro registran variaciones relativas de un $\pm 30\%$, siendo esta una gran diferencia. Así mismo, en la evaluación económica se pueden tener ingresos que resultan ser el doble dependiendo del equipo

seleccionado. Por lo mismo una evaluación económica, debe realizarse de manera minuciosa pero no considerarse como un criterio único en la toma de decisiones.

De la evaluación económica, se desprende que la instalación de una microcentral de generación produce una buena fuente de ingresos para las asociaciones de canalistas y regantes, quienes reciben rédito a través de la utilización del recurso que poseen. La posibilidad de obtener retribuciones por un potencial que está ahí, esperando ser aprovechado genera un beneficio en todos los usuarios, puesto que los ingresos pueden ser utilizados en labores de mejoramiento, mantención e instrumentación de los canales, así como también en máquinas para el bombeo del recurso, permitiendo llevar agua a lugares que sin la impulsión sería difícil lograr.

Se hace necesario también hacer referencia al factor de planta obtenido para el canal Hurtado, en éste se obtuvo un indicador igual a 1. Como se discute, esto pareciera ser directamente una subestimación de las obras. Para hacer que este valor tienda a números estipulados en la literatura, (0,4-0,6) mediante la ampliación de las obras, impacta directamente en la evaluación económica, reportando mayores ingresos ya que se puede producir mayor energía, pero a un costo de inversión más alto. Un efecto inmediato de lo anterior es quedar fuera de los beneficios de la Ley de Generación Distribuida, y escapando de los alcances propuestos para este Trabajo.

5. Comentarios y conclusiones

Las peculiaridades propias de cada proyecto hacen difícil establecer criterios taxativos que puedan ser aplicados bajo cualquier circunstancia y permitan resolver un problema con un espectro de soluciones tan amplio como es el caso de la selección de Tecnología de Microgeneración Hidroeléctrica. Por lo mismo en este trabajo se presentan criterios con el objetivo de orientar y ayudan a discriminar las alternativas de manera sencilla.

Vive un potencial no desarrollado en los Derechos de Aprovechamiento de Agua que disponen los regantes, que puede transformarse, con algunas modificaciones a las normativas legales vigentes, en una fuente de ingreso para los usuarios de estas obras y propietarios de los derechos, los agricultores - personas comunes que pueden acogerse a estos beneficios. La fuente de ingreso proyectada se basa en la producción de energía limpia con mínimos impactos ambientales. Una energía que, como se demostró en los dos casos, está ahí, esperando ser explotada con una mínima intervención del cauce, aunque con un elevado costo de inversión. A raíz del elevado capital necesario para la implantación de esta tecnología, en este trabajo se busca una forma de obtener rédito de dicha inversión.

Es imperioso señalar en este punto que el objetivo de la Ley General de Servicios Eléctricos fue escrita para que personas y asociaciones puedan acogerse a sus garantías y participar de los beneficios de un aprovechamiento de microgeneración, esperando que éstos no se conviertan en un mercado indiscriminado de venta de energía. Debido a esto último, los legisladores decidieron establecer que toda la potencia producida fuera solo para autoconsumo, limitando la posibilidad de vender los excedentes.

Esta ley ha sido sometida, durante este trabajo, al caso particular de la generación orientada a facilitar las faenas propias del riego, entre las que se pueden destacar: Operación de pozos profundos, llenado de tranques o estanques en una cota superior, impulsión hacia sectores elevados permitiendo ampliar la superficie cultivable, entre otros. Para desarrollar dichas faenas 300 [kW] resulta ser una potencia sobreestimada, por lo que en muchos casos es posible que se generen excedentes, pero muy baja para sustentar un negocio hidroeléctrico, esta idea se sostiene en la escases del recurso y sus variaciones estacionales que no permiten asegurar un suministro constante.

Por lo anterior, la ley debería ampliarse volviendo a sus inicios, antes de la modificación de 2017, cuando permitía que los excedentes fueran vendidos a precio de distribuidor. Esto permitiría favorecer el autoconsumo, pero a su vez aumentaría el interés por invertir en estos equipos, que como se ve en la evaluación económica, ampliar la normativa permitiendo la venta, reporta una retribución económica considerable.

Pasando a otro punto, se hace necesario hacer notar con respecto a los cuatro criterios descritos, que todos son complementarios entre sí y diseñados con el fin de orientar a los usuarios durante la toma de decisión respecto a cual equipo utilizar frente a un mismo escenario, con el fin de barajar todas las alternativas, sus beneficios y perjuicios. A grandes rasgos, un usuario común se encuentra frente a un potencial aprovechamiento y, a lo menos, con trece equipos electromecánicos con características particulares cada uno, si se considera que un mismo equipo se puede implantar utilizando configuraciones en serie y/o paralelo, ya no son trece alternativas, sino que el espectro aumenta ostensiblemente. Tras aplicar los métodos de discernimiento descritos, el espectro se reduce y permite tomar una decisión bajo escenarios donde las turbinas son comparables entre sí.

Los criterios son complementarios entre sí, pues de uno se puede pasar a otro que requiere un grado de información más detallada. A saber, en todos los casos la forma más fácil de acotar la gama ofrecida de equipos es a través del Ábaco, elemento muy gráfico para la toma de decisiones, al mismo nivel de éste, para acotar las posibles turbinas a instalar, se encuentra el Criterio a Partir de la Infraestructura existente. Una vez que uno reduce el espectro y se queda con menos posibilidades, se puede aplicar el Análisis Económico y el Criterio Multivariable.

El Análisis Económico es un factor preponderante para quien hace la inversión y persigue por objetivo obtener retribución económica de ello. Sin embargo, es necesario considerar otros aspectos que quedan fuera de un Flujo de Caja, la disponibilidad de servicio técnico, por ejemplo, garantiza una vida prolongada del activo. Otro ejemplo, es considerar la particularidad del mecanismo de compatibilizar la vida de especies acuáticas con la Generación Hidroeléctrica, así minimizar los impactos ambientales sobre el canal. Por lo mismo el Análisis Multivariable es una herramienta, simple pero potente, que permite incorporar éstas y otras características, con el fin de medirlas con un mismo criterio.

Es necesario hacer notar que los equipos tienen en promedio una vida útil de 50 años, pensando en que la recuperación se proyecta al cabo de 5 años, la implantación de estos equipos supone una

buena fuente de ingresos capaz de prolongarse a lo largo del tiempo. Un servicio técnico que asegure ese período de ganancias es una ventaja en sí misma.

También se hace necesario advertir, algunas ventajas que presentan ciertas tecnologías de microgeneración por sobre las otras, este es el caso de la modularidad, que poseen en mayor o menor medida todos los equipos de microgeneración. Éste es un rasgo bastante útil que permite instalar equipos en espacios reducidos, adaptándose muy bien a las condiciones de superficie disponible sin necesidad de recurrir a la utilización de terrenos a través de compra, arriendo o servidumbre de éstos, lo que implican un costo adicional al Proyecto. A su vez, esta característica permite la instalación de equipos en lugares de acceso restringido, donde se hace difícil el ingreso de maquinarias, omitiendo la necesidad de construir caminos robustos capaces de soportar grandes cargas.

En otro punto, se hace una mención especial a la turbina CrossFlow y de Tipo Sifón. La primera, tiene un terreno bien ganado en Chile, es la turbina más utilizada y en este texto se valida el por qué: la capacidad de adaptarse a las fluctuaciones de caudal, su elevada eficiencia, entre otras, la hacen un equipo altamente competitivo.

Se establece como una paradoja, el considerar que al ser una tecnología tan probada y de tanta reputación es la mejor. Como se revisa en los casos de aplicación, en particular durante el análisis multicriterio, las mayores diferencias de este producto con respecto a los otros se marcan en los ítems de Tecnología Probada en Chile y la Disponibilidad de Servicio Técnico, variables que vienen dado producto de su numerosa utilización. La paradoja, entonces se produce en que, como es un equipo tan bueno se siga utilizando sin considerar otras alternativas, teniendo presente que sus bondades vienen dadas principalmente porque ya es un equipo bastante utilizado.

Sin embargo, dejando los prejuicios, nuevas tecnologías se alzan como competencia a la turbina de Flujo Cruzado. Más aún, las tecnologías en vías de desarrollo como la de tipo Sifón que requiere menores costos de inversión, puede llegar a competir con la CrossFlow, la desventaja de ésta es la escasa reputación que tiene a nivel local.

De igual forma, el Tornillo de Arquímedes es una Tecnología que requiere ser más desarrollada para entrar en un mercado a niveles competitivos con la actual oferta de turbinas, el abaratamiento de los costos de esta turbina convertiría a este equipo en una buena alternativa. Su ventaja es

permitir la circulación libre de peces y la facilidad que tienen de trabajar aún en condiciones que el canal posea un gasto sólido elevado.

Para finalizar, añadir algunos comentarios: se espera que este texto sirva como incentivo para descubrir el potencial de Microgeneración Hidroeléctrica en la Infraestructura de Riego Existente y en Vías de ser Desarrollado, potencial que puede significar un negocio con beneficios para los regantes, agricultores y asociaciones de éstos, quienes podrían recibir una retribución por los Derechos de Aprovechamiento que poseen. Si bien, para lograr este objetivo se requeriría una modificación en la legislación vigente, se considera que esta normativa actualmente está bien enfocada. Dar la posibilidad a los propietarios del agua de hacer inyección de energía al Sistema, supone una buena fuente de ingresos, pero a su vez, la limitación existente de 300 [kW] es un número razonable, que permite incentivar el uso de la energía, potenciando la agricultura sin la necesidad de que los privados que disponen del recurso cambien de giro y se dediquen a la generación dejando de lado el sector agrícola.

A lo anterior, se le debe sumar la posibilidad de ampliar los beneficios aportados por la Ley de Riego y extender dicho beneficio a través del bono que permite mejorar las Obras y su ampliación a las Tecnologías de Microgeneración, siempre y cuando éstas vayan en beneficio del riego. Como se puede suponer, ser capaces de producir energía para autoconsumo facilita la vida, en particular en labores del riego permite impulsar el agua a través de pozos profundos y llevar el recurso a niveles más altos o inclusive almacenarlos para ser utilizados en momentos que sea requerido.

Bibliografía

- Adau, S. e. (2012). Mini-hydro power generation on existing irrigation projects: Case study of Indian sites. *ELSEVIER*, 4785-4795.
- Agudelo, D. (2019, 08 29). *Centrales Hidroeléctricas*. Retrieved from <http://centraleshidroelectricasdeantioquia.blogspot.com/>
- Andritz. (2012). *Hydrodynamic screw*. Alemania.
- Andritz. (2015). *ANDRITZ pumps used as turbines*. Graz.
- Cinik. (2019, 08 26). *Cinik Hydro Energy*. Retrieved from <http://cink-hydro-energy.com/en/2-cell-crossflow-turbine/>
- CNR. (2005). Manual sobre Fuentes de Energía para Sistemas de Impulsión en Obras Menores de Riego. Santiago.
- CNR. (2016). *Catálogo de Proveedores Mini Hidro*. Santiago: Ministerio de Energía.
- Fernandez, P. (2002). Turbinas Kaplan y Bulbo. Madrid.
- Gho Barba, J. (2015). *MANUAL PARA LA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE RIEGO Con fuentes de energías renovables no convencionales- microhidros, a los concursos de la ley 18.450*. Santiago: Ministerio de Energía.
- Gho Barba, J. (2016). *Caracterización del mercado de tecnologías para la microgeneración Hidroeléctrica*. Santiago.
- Gikes. (2016). *Gikes turgo impulse Hydro Turbine*. Kendal.
- Harambour, F. (2003). Introducción al Proyecto de Centrales Hidroeléctricas. Santiago: EPS.
- HidroGD. (2019, 05 25). Retrieved from <http://hidro.gd/turbina/>
- Loots, I. (2015). A review of low head hydropower technologies and applications in a South African context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1254-1268.
- Mary. (2019, 08 26). *Eco Evolution I*. Retrieved from <http://ecoevolution.ie/blog/the-benefits-of-an-archimedean-screw-hydropower-turbine/>

- MAVEL. (2014). *Mavel Hydro Turbines*. Benesov, Republica Checa.
- MAVEL. (2015). *TM MODULAR MICRO TURBINE*. Benešov.
- Ministerio de Energía. (2014). Energías Renovables en Chile. In C. Santana. Santiago.
- Ministerio de Energía. (2018, 11 04). *Explorador de Derechos de Aprovechamiento de Aguas No Consuntivos*. Retrieved from <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/DAANC2016/>
- Natel Energy. (2018). *HydroEngine*. California.
- Nazari-Heris, M. (2016). Design of small Hydro Generation Systems. In *Distributed generation systems* (pp. 301-302). Oxford: Elsevier.
- Nuramal, A. (2017). Experimental study of screw turbine performance based on different angle of inclination. *Energy Procedia*, 8-13.
- Ossberger. (2019, 08 26). *Ossberger*. Retrieved from <https://ossberger.de/en/hydropower-technology/>
- Peikan, B. (2006). *Guía para el desarrollo de una pequeña centra hidroeléctrica*. Belgica: ESHA.
- RIVERS. (2014). *Comparative study of small hydropower station*. Belgica: European Union.
- Spaams Babcock. (2015). *Archimedean Screw Turbine*. Balk.
- Turbulent. (2019, 05 26). *Turbulent*. Retrieved from <https://www.turbulent.be/technology>
- WATS. (n.d.). *PROYECTO DE CONEXIÓN DEL CANAL LOS CANTOS AL CANAL DE DISTRIBUCIÓN DERIVADO PONIENTE SUR*. Santiago.
- WEC. (2016). World Energy Resources, Hydropower.
- Zhou, D. e. (2019). Development of an ultra-low head siphon hydro turbine using computational fluid dynamics. *Energy* 181, 43-50.
- ZOTLÖTERER. (2018, 15 22). *Z O T L Ö T E R E R*. Retrieved from zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/zotloeterer-turbine/

Anexo A: Resumen de turbinas estudiadas

Catastro de equipos de generación hidroeléctrica

En la siguiente tabla se resume el catastro de equipos electromecánicos realizado para elaborar la descripción de estos. la información corresponde a la que entregan sus proveedores a través de sus páginas web y los folletos. cotejada con otras referencias como textos e informes.

	Tipo de Turbina	Proveedor	Rango de Caudal[m ³ /s]	Rango de Caída [m]	Potencia Salida [KW]
Turbinas de impulso	Pelton	Powespout	0,008-0,01	3-100	<1,6
		Mavel	0,1-10	50-1000	<30.000
		Gikes	0,02-10	10-800	20-20.000
		Mavel	0,1-10	50-1000	60-30.000
	CrossFlow	IREM	0,01-1,0	5-60	<100
		OSSberger	0,04-13	2,5-200	15-5.000
		Wasserkraft volk	1,5-150	No informado	<2.000
	T. Arquímedes	Andritz	0,25-10	1-10	<500
		Hidro Coil	<10	4-20	2-8
		3 Helix Power	0,2-10	1-10	1,4-700
	Waterwherel	Hydrowatt	0,1-5	1-10	1,5-200
		Steffturbine	<0,4	2,5-5	10
	Turgo	Gikes	0,6-14	8-200	No informado

	Tipo de Turbina	Proveedor	Rango de Caudal[m ³ /s]	Rango de Caída [m]	Potencia Salida [KW]
Turbinas de reacción	Francis	Wasserkraft volk	No informado	<300	<20.000
		Mavel	0,5-30	15-300	20-30.000
		Gilkes	0,05-40	<400	<20.000
		Voith	No informado	3-95	5-1.000.000
		Hydrolink	No informado	20-120	No informado
		Kössler	0,8-60	15-250	500-15.000
	Kaplan (Propeller y Buble)	OSSberger	1,5-12	0,7-40	20-2.000
		Mavel (Buble)	2-60	2-35,0	30-2.0000
		Voith	No informado	3-95,0	100-400.000
		Energy systems and design	0,03-0,06	0,5-3,0	0,09-1
		Wasserkraft	No informado	1-40,0	No informado
		Alstom	0,3-150	2-30,0	<130.000
		Hydrolink	2,4-3	No informado	5-25,0
	HydroEngine	Natel Energy	1-200	3-20,0	25-1.000
	Vórtice	Zotlöyerer	0,05-20	No informado	0,5-160
		Turbulent	1,2-5	1,5-3	10-100
	Sifón	Mavel	0,15-5	1,5-6	1-180
	Bomba como turbina	Andritz	0,3-6	3-80,0	3-310
		Voith	No informado	0-700	10-500
		Cornell	<0,42	<120	No informado
	Hidrocínética	Alternate hydro	>0,8m/s	>0,3	1-4,0
		New Energy Corporation	2,4-3m/s	No informado	5-25,0
		Alden	1,5-3	0,15	No informado
Hydrovolts		1,5-3m/s	0,7-2	1,5-12	

Anexo B: Análisis hidrológico

El análisis de los caudales disponibles para los canales de la primera sección del río Aconcagua. se hace a partir de la central Chacabuquito. ubicada en el cauce principal. se presentan a continuación los datos de esta estación.

Estación:	Chacabuquito
Código BNA:	
Cuenca:	Aconcagua
SubCuenca:	
Altitud (msnm):	950
Latitud S:	32° 51' 01"
Longitud W:	70° 30' 34"
UTM Norte (mts):	6364246
UTM Este (mts):	358743
Área de Drenaje (km2):	2400

Se presenta a continuación la tabla que resume los resultados para obtener la conversión de acciones a flujo en l/s.

Para últimos 30 años	Acciones	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom Anual	3 meses max	Total
Q Promedio DGA 30 años		30,72	35,42	22,26	14,02	12,50	14,70	14,59	16,11	19,75	31,67	58,23	72,32	28,52	46,15	342,28
Qe = 20% x Q Promedio		5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70		
%(Qe/Qpromedio anual)		19%	16%	26%	41%	46%	39%	39%	35%	29%	18%	10%	8%	27%		
Q Min mes 30		17,25	15,36	12,05	7,85	5,98	4,85	5,55	6,02	6,56	8,96	12,11	14,5	9,75	15,70	
% Qe/Qmin mes		33%	37%	47%	73%	95%	118%	103%	95%	87%	64%	47%	39%	70%		
Qd=Qprom-Qe		25,01	29,72	16,56	8,31	6,79	8,99	8,89	10,41	14,05	25,96	52,52	66,61	22,82		
Qmin - Qe		11,55	9,66	6,35	2,15	0,28	-0,85	-0,15	0,32	0,86	3,26	6,41	8,80	4,05		
Equivalencia l/s/acc año promedio		1,958	2,327	1,296	0,651	0,532	0,704	0,696	0,815	1,100	2,032	4,112	5,215	1,79	3,17	
Equivalencia l/s/acc año min		0,904	0,756	0,497	0,168	0,022	-0,067	-0,012	0,025	0,067	0,255	0,501	0,689	0,32	0,78	

Anexo C: Flujo de caja para el Canal San Rafael – Los Cantos

- Tornillo de Arquímedes

EVALUACIÓN PROYECTO MICRO CENTRAL DE RIEGO EN CANAL SAN RAFAEL-LOS CANTOS-LOS ANDES

Monto a Invertir	
CAPEX (\$)	568.475.993
BONIFICACIÓN CNR	80%
PAGO BONIFICACIÓN (mes)	15
TASA DESCUENTO	6%

Ingresos	
POTENCIA instalada (kW)	230
FACTOR DE PLANTA (días/año)	145
GENERACIÓN ANUAL (kwh/año)	800.400
PRECIO VENTA ENERGÍA (\$/kwh)	69,63
INGRESOS año (\$)	55.730.251

Egresos	
MANTENCIÓN ANUAL	5%
ADMINISTRACIÓN	10%
COSTO FINANCIERO	5%
SEGUROS (%)	1,0%

Respecto a los ingresos anuales
Respecto a los ingresos anuales
Respecto al CAPEX
Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos

	CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
TOTAL																				
INGRESOS (\$)																				
BONIFICACIÓN CNR		454.780.794																		
VENTA ENERGÍA		27.865.126	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251
TOTAL INGRESOS		482.645.920	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251	55.730.251
EGRESOS (\$)																				
CAPEX	568.475.993																			
MANTENCIÓN	27.865.126	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513	2.786.513
ADMINISTRACIÓN	55.730.251	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025	5.573.025
SEGUROS	56.847.599	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760
COSTO FINANCIERO	41.214.509	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760	5.684.760
TOTAL EGRESOS	750.133.479	19.729.058	18.307.868	16.886.678	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298	14.044.298
RESULTADO (\$)	234.084.702	462.916.862	37.422.384	38.843.574	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954	41.685.954
RESULTADO ACUMULADO (\$)		-133.982.930	-96.560.547	-57.716.973	-16.031.019	25.654.934	67.340.888	109.026.841	150.712.795	192.398.749	234.084.702									
CANAL HURTADO (%)																				
PAGO A REGANTES	85.456.205																			
UTILIDAD INVERSIONISTA	148.628.497	462.916.862	37.422.384	38.843.574	39.601.656	33.348.763	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168	29.180.168
UTILIDAD ACUMULADA		-133.982.930	-96.560.547	-57.716.973	-18.115.317	15.233.446	44.413.613	73.593.781	102.773.948	127.785.521	148.628.497									
VAN	46.750.450	436.714.021	33.305.788	32.613.813	31.368.221	24.920.136	20.570.867	19.406.478	18.307.998	14.804.311	11.638.609									
TIR																				

- Turbina tipo Sifón

EVALUACIÓN PROYECTO MICRO CENTRAL DE RIEGO EN CANAL SAN RAFAEL-L OS CANTOS-L OS ANDES

Monto a Invertir	
CAPEX (\$)	322.951.751
BONIFICACIÓN CNR	80%
PAGO BONIFICACIÓN (mes)	15
TASA DESCUENTO	6%

Ingresos	
POTENCIA instalada (kW)	200
FACTOR DE PLANTA (días/año)	145
GENERACIÓN ANUAL (Kwh/AÑO)	696.000
PRECIO VENTA ENERGÍA (\$/kWh)	69,63
INGRESOS año (\$)	48.461.088

Egresos	
MANTENCIÓN ANUAL	5% Respecto a los ingresos anuales
ADMINISTRACIÓN	10% Respecto a los ingresos anuales
COSTO FINANCIERO	5% Respecto al CAPEX
SEGUROS (%)	1,0% Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TOTAL	CONSTRUCCIÓN	OPERACIÓN									
INGRESOS (\$)											
BONIFICACIÓN CNR		258.361.401									
VENTA ENERGÍA		24.230.544	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088
TOTAL INGRESOS	-	282.591.945	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088	48.461.088
EGRESOS (\$)											
CAPEX	322.951.751										
MANTENCIÓN	24.230.544	2.423.054	2.423.054	2.423.054	2.423.054	2.423.054	2.423.054	2.423.054	2.423.054	2.423.054	2.423.054
ADMINISTRACIÓN	48.461.088	4.846.109	4.846.109	4.846.109	4.846.109	4.846.109	4.846.109	4.846.109	4.846.109	4.846.109	4.846.109
SEGUROS	32.295.175	3.229.518	3.229.518	3.229.518	3.229.518	3.229.518	3.229.518	3.229.518	3.229.518	3.229.518	3.229.518
COSTO FINANCIERO	23.414.002	16.147.588	2.422.138	1.614.759							
TOTAL EGRESOS	451.352.560	13.728.198	12.920.819	12.113.439	10.498.681	10.498.681	10.498.681	10.498.681	10.498.681	10.498.681	10.498.681
RESULTADO (\$)											
CAPEX	267.389.177	-339.099.339	35.540.269	36.347.649	37.962.407	37.962.407	37.962.407	37.962.407	37.962.407	37.962.407	37.962.407
RESULTADO ACUMULADO (\$)		-70.235.592	-34.695.323	1.652.326	39.614.733	77.577.140	115.539.548	153.501.955	191.464.362	229.426.769	267.389.177
CANAL HURTADO (%)											
PAGO A REGANTES	77.822.935	-	-	-	1.898.120	7.592.481	11.388.722	11.388.722	11.388.722	11.388.722	11.388.722
UTILIDAD INVERSIONISTA	189.566.242	-339.099.339	35.540.269	36.347.649	36.064.287	30.369.926	26.573.685	26.573.685	26.573.685	26.573.685	26.573.685
UTILIDAD ACUMULADA		-339.099.339	-70.235.592	-34.695.323	1.652.326	37.716.613	68.086.538	94.660.224	121.233.909	147.807.594	170.585.038
VAN	105.115.089	-339.099.339	31.630.713	30.518.187	28.566.293	22.694.175	18.733.399	17.673.018	16.672.659	13.481.934	10.599.005
TIR											12,1%

- Turbina tipo Vórtice Gravitacional

EVALUACIÓN PROYECTO MICRO CENTRAL DE RIEGO EN CANAL SAN RAFAEL-LOS CANTOS-LOS ANDES

Monto a Invertir	
CAPEX (\$)	329.584.341
BONIFICACIÓN CNR	80%
PAGO BONIFICACIÓN (mes)	15
TASA DESCUENTO	6%

Ingresos	
POTENCIA instalada (kW)	110
FACTOR DE PLANTA (días/año)	203
GENERACIÓN ANUAL (Kwh/AÑO)	535.920
PRECIO VENTA ENERGÍA (\$/kWh)	69,63
INGRESOS año (\$)	37.315.038

Egresos	
MANTENCIÓN ANUAL	5% Respecto a los ingresos anuales
ADMINISTRACIÓN	10% Respecto a los ingresos anuales
COSTO FINANCIERO	5% Respecto al CAPEX
SEGUROS (%)	1,0% Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos

	OPERACIÓN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TOTAL CONSTRUCCIÓN	0									
INGRESOS (\$)										
BONIFICACIÓN CNR		263.667.473								
VENTA ENERGÍA		18.657.519	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038
TOTAL INGRESOS	-	282.324.992	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038	37.315.038
EGRESOS (\$)	0	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CAPEX	329.584.341									
MANTENCIÓN	18.657.519	1.865.752	1.865.752	1.865.752	1.865.752	1.865.752	1.865.752	1.865.752	1.865.752	1.865.752
ADMINISTRACIÓN	37.315.038	3.731.504	3.731.504	3.731.504	3.731.504	3.731.504	3.731.504	3.731.504	3.731.504	3.731.504
SEGUROS	32.958.434	3.295.843	3.295.843	3.295.843	3.295.843	3.295.843	3.295.843	3.295.843	3.295.843	3.295.843
COSTO FINANCIERO	23.894.865	2.479.217	2.471.883	1.647.922						
TOTAL EGRESOS	442.410.196	12.188.942	11.364.982	10.541.021	8.893.099	8.893.099	8.893.099	8.893.099	8.893.099	8.893.099
RESULTADO (\$)	175.750.135	270.136.049	25.950.056	26.774.017	28.421.939	28.421.939	28.421.939	28.421.939	28.421.939	28.421.939
RESULTADO ACUMULADO (\$)		-75.927.509	-49.977.453	-23.203.436	5.218.503	33.640.442	62.062.380	90.484.319	118.906.258	147.328.196
CANAL HURTADO (%)		0	0	0	5%	20%	30%	30%	40%	50%
PAGO A REGANTES	58.264.974				1.421.097	5.684.388	8.526.582	8.526.582	11.368.775	14.210.969
UTILIDAD INVERSIONISTA	117.485.161	270.136.049	25.950.056	26.774.017	27.000.842	22.737.551	19.895.357	19.895.357	17.053.163	14.210.969
UTILIDAD ACUMULADA		-75.927.509	-49.977.453	-23.203.436	3.797.406	26.534.957	46.430.314	66.325.671	86.221.028	103.274.191
VAN	50.503.882	254.845.329	23.095.458	22.479.981	21.387.196	16.990.821	14.025.442	13.231.549	12.482.593	10.093.741
TIR	12,1%									

- Turbina tipo CrossFlow

Anexo D: Flujo de Caja para el Canal Unificado Hurtado- Ramírez Salero

- Turbina tipo Tornillo de Arquímedes

EVALUACIÓN PROYECTO MICRO CENTRAL DE RIEGO EN CANAL HURTADO												
Monto a Invertir		Ingresos			Egresos			Respecto a los ingresos anuales				
CAPEX (\$)	685.128.929	POTENCIA instalada (kW)	300	MANTENCIÓN ANUAL	5%	Respecto a los ingresos anuales	5%	Respecto a los ingresos anuales	5%	Respecto al CAPEX		
BONIFICACIÓN CNR	80%	FACTOR DE PLANTA (días/año)	145	ADMINISTRACIÓN	10%	Respecto a los ingresos anuales	10%	Respecto a los ingresos anuales	10%	Respecto al CAPEX		
PAGO BONIFICACIÓN (mes)	15	GENERACIÓN ANUAL (kwh/año)	1.044.000	COSTO FINANCIERO	5%	Respecto al CAPEX	5%	Respecto al CAPEX	5%	Respecto al CAPEX		
TASA DESCUENTO	6%	PRECIO VENTA ENERGÍA (\$/AWh)	69,63	SEGUROS (%)	1,0%	Respecto al CAPEX	1,0%	Respecto al CAPEX	1,0%	Respecto al CAPEX		
		INGRESOS año (\$)	72.691.632			50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos						
TOTAL	CONSTRUCCIÓN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS (\$)												
BONIFICACIÓN CNR			548.103.143									
VENTA ENERGÍA			36.345.816		72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632
TOTAL INGRESOS			584.448.959		72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632
EGRESOS (\$)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
CAPEX	685.128.929											
MANTENCIÓN		3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	
ADMINISTRACIÓN		7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	
SEGUROS		6.851.289	6.851.289	6.851.289	6.851.289	6.851.289	6.851.289	6.851.289	6.851.289	6.851.289	6.851.289	
COSTO FINANCIERO		49.671.847	34.256.446	5.138.467	3.425.645							
TOTAL EGRESOS	912.351.117	719.385.375	22.893.501	21.180.679	17.755.084	17.755.084	17.755.084	17.755.084	17.755.084	17.755.084	17.755.084	
RESULTADO (\$)	326.322.530	-719.385.375	559.842.636	49.798.131	51.510.953	54.936.598	54.936.598	54.936.598	54.936.598	54.936.598	54.936.598	
RESULTADO ACUMULADO (\$)		-719.385.375	-159.542.740	-109.744.609	-58.233.655	-3.297.058	51.639.540	106.576.138	161.512.736	216.449.334	271.385.932	326.322.530
CANAL HURTADO (%)			0	0	0	5%	20%	30%	30%	40%	50%	
REGANTES (ACUMULADO)	112.620.026					2.746.830	10.987.320	16.480.979	16.480.979	16.480.979	21.974.639	27.468.299
ANUAL	213.702.504		559.842.636	49.798.131	51.510.953	52.189.768	43.949.278	38.455.619	38.455.619	38.455.619	32.961.959	27.468.299
ACUMULADO		-719.385.375	-159.542.740	-109.744.609	-58.233.655	-6.043.887	37.905.391	76.361.009	114.816.628	153.272.247	186.234.205	213.702.504
VAN	82.179.140		528.153.430	44.320.159	43.249.590	41.339.185	32.841.457	27.109.694	25.575.183	24.127.531	19.510.133	15.338.155
TIR	12,1%											

- Turbina tipo Sifón

EVALUACIÓN PROYECTO MICRO CENTRAL DE RIEGO EN CANAL HURTADO

Monto a Invertir	
CAPEX (\$)	417.760.267
BONIFICACIÓN CNR	80%
PAGO BONIFICACIÓN (mes)	15
TASA DESCUENTO	6%

Ingresos	
POTENCIA Instalada (kW)	300
FACTOR DE PLANTA (días/año)	145
GENERACIÓN ANUAL (kwh/año)	1.044.000
PRECIO VENTA ENERGIA (\$/kWh)	69,63
INGRESOS año (\$)	72.691.632

Egresos	
MANTENCIÓN ANUAL	5%
ADMINISTRACIÓN	10%
COSTO FINANCIERO	5%
SEGUROS (%)	1,0%

Respecto a los Ingresos anuales
Respecto a los Ingresos anuales
Respecto al CAPEX
Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos

	CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
TOTAL	0												
INGRESOS (\$)													
BONIFICACIÓN CNR			334.208.214										
VENTA ENERGÍA		36.345.816	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632
TOTAL INGRESOS		370.554.030	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632	72.691.632
EGRESOS (\$)													
CAPEX	0	417.760.267											
MANTENCIÓN		3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582
ADMINISTRACIÓN		7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163
SEGUROS		4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603	4.177.603
COSTO FINANCIERO		30.287.619	20.888.013										
TOTAL EGRESOS		598.861.361	438.648.280	17.170.149	15.081.347	15.081.347	15.081.347	15.081.347	15.081.347	15.081.347	15.081.347	15.081.347	15.081.347
RESULTADO (\$)		425.917.357	-438.648.280	55.521.483	57.610.285	57.610.285	57.610.285	57.610.285	57.610.285	57.610.285	57.610.285	57.610.285	57.610.285
RESULTADO ACUMULADO (\$)			-438.648.280	-32.876.118	22.645.365	80.255.649	137.865.934	195.476.218	253.086.503	310.696.787	368.307.072	425.917.357	425.917.357
CANAL HURTADO (%)		0	0	0	5%	20%	30%	30%	30%	30%	40%	50%	50%
PAGO A REGANTES					2.880.514	11.522.057	17.283.085	17.283.085	17.283.085	17.283.085	23.044.114	28.805.142	28.805.142
UTILIDAD INVERSIONISTA		351.295.079	54.477.083	55.521.483	54.729.770	46.088.228	40.327.199	40.327.199	40.327.199	40.327.199	34.566.171	28.805.142	28.805.142
UTILIDAD ACUMULADA		-87.353.201	-32.876.118	22.645.365	77.375.135	123.463.363	163.790.562	204.117.761	244.444.960	279.011.131	307.816.273	307.816.273	307.816.273
VAN		331.410.452	48.484.410	46.616.908	43.351.104	34.439.805	28.429.084	26.819.891	25.301.784	20.459.663	16.084.641	16.084.641	16.084.641
TIR													12,1%

- Turbina tipo Vórtice Gravitacional

EVALUACIÓN PROYECTO MICRO CENTRAL DE RIEGO EN CANAL HURTADO												
Monto a Invertir			Ingresos			Egresos			Respecto a los Ingresos anuales			
CAPEX (\$)	742.750.646		POTENCIA Instalada (kW)	275		MANTENCIÓN ANUAL	5%		Respecto a los Ingresos anuales			
BONIFICACIÓN CNR	80%		FACTOR DE PLANTA (días/año)	203		ADMINISTRACIÓN	10%		Respecto a los Ingresos anuales			
PAGO BONIFICACIÓN (mes)	15		GENERACIÓN ANUAL (kwh/año)	1.339.800		COSTO FINANCIERO	5%		Respecto al CAPEX			
TASA DESCUENTO	6%		PRECIO VENTA ENERGÍA (\$/kWh)	69,63	Netbilling	SEGUROS (%)	1,0%		Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos			
			INGRESOS año (\$)	93.287.594								
TOTAL		CONSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		0										
INGRESOS (\$)												
BONIFICACIÓN CNR	594.200.517											
VENTA ENERGÍA	46.643.797		93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594
TOTAL INGRESOS	1.480.432.664	-	640.844.314	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594	93.287.594
EGRESOS (\$)		0	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
CAPEX	742.750.646	742.750.646										
MANTENCIÓN	46.643.797		4.664.380	4.664.380	4.664.380	4.664.380	4.664.380	4.664.380	4.664.380	4.664.380	4.664.380	4.664.380
ADMINISTRACIÓN	93.287.594		9.328.759	9.328.759	9.328.759	9.328.759	9.328.759	9.328.759	9.328.759	9.328.759	9.328.759	9.328.759
SEGUROS	74.275.065		7.427.506	7.427.506	7.427.506	7.427.506	7.427.506	7.427.506	7.427.506	7.427.506	7.427.506	7.427.506
COSTO FINANCIERO	53.849.422	37.137.532	5.570.630	3.713.753								
TOTAL EGRESOS	1.010.806.524	779.888.178	26.991.275	25.134.399	21.420.646	21.420.646	21.420.646	21.420.646	21.420.646	21.420.646	21.420.646	21.420.646
RESULTADO (\$)	469.626.140	-779.888.178	66.296.319	68.153.196	71.866.949	71.866.949	71.866.949	71.866.949	71.866.949	71.866.949	71.866.949	71.866.949
RESULTADO ACUMULADO (\$)		-779.888.178	-167.892.016	-101.595.697	-33.442.502	38.424.447	110.291.396	182.158.344	254.025.293	325.892.242	397.759.191	469.626.140
CANAL HURTADO (%)			0	0	0	5%	20%	30%	30%	40%	50%	
PAGO A REGANTES	147.327.245					3.593.347	14.373.390	21.560.085	21.560.085	21.560.085	21.560.085	21.560.085
UTILIDAD INVERSIONISTA	322.298.895		611.996.162	68.153.196	68.273.601	57.493.559	50.306.864	50.306.864	50.306.864	50.306.864	50.306.864	50.306.864
UTILIDAD ACUMULADA		-779.888.178	-167.892.016	-101.595.697	-33.442.502	34.831.099	92.324.658	142.631.523	192.938.387	243.245.251	286.365.420	322.298.895
VAN	156.806.803	-779.888.178	571.354.870	59.003.488	57.222.737	54.079.087	42.962.532	35.464.354	33.456.938	31.563.149	25.522.762	20.065.064
TIR												12,1%

- Turbina tipo CrossFlow

EVALUACIÓN PROYECTO MICRO CENTRAL DE RIEGO EN CANAL HURTADO														
Monto a Invertir		Ingresos			Egresos			Respecto a los ingresos anuales						
CAPEX (\$)	554.559.737	POTENCIA instalada (kW)	300	MANTENCIÓN ANUAL	5%	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales				
BONIFICACIÓN CNR	80%	FACTOR DE PLANTA (días/año)	145	ADMINISTRACIÓN	10%	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales	Respecto a los ingresos anuales				
PAGO BONIFICACIÓN (mes)	15	GENERACIÓN ANUAL (Kwh/AÑO)	1.044.000	COSTO FINANCIERO	5%	Respecto al CAPEX	Respecto al CAPEX	Respecto al CAPEX	Respecto al CAPEX	Respecto al CAPEX				
TASA DESCUENTO	6%	PRECIO VENTA ENERGÍA (\$/Kwh)	69.63	SEGUROS (%)	1,0%	Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos	Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos	Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos	Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos	Respecto al CAPEX. Se debe considerar que el 50% del CAPEX es obra civil, y un % menor serán equipos				
		INGRESOS año (\$)	72.691.632											
TOTAL		CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS (\$)		0			443.647.790									
BONIFICACIÓN CNR	443.647.790													
VENTA ENERGÍA	690.570.504				36.345.816									
TOTAL INGRESOS	1.134.218.294	-			479.993.606									
EGRESOS (\$)		0			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CAPEX	554.559.737	554.559.737												
MANTENCIÓN	36.345.816				3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582	3.634.582
ADMINISTRACIÓN	72.691.632				7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163	7.269.163
SEGUROS	55.455.974				5.545.597	5.545.597	5.545.597	5.545.597	5.545.597	5.545.597	5.545.597	5.545.597	5.545.597	5.545.597
COSTO FINANCIERO	40.205.581	27.727.987			4.159.198	2.772.799								
TOTAL EGRESOS	759.258.740	582.287.724			21.994.940	20.608.540	19.222.141	16.449.342	16.449.342	16.449.342	16.449.342	16.449.342	16.449.342	16.449.342
RESULTADO (\$)	374.959.554	-582.287.724			457.998.666	52.083.092	53.469.491	56.242.290	56.242.290	56.242.290	56.242.290	56.242.290	56.242.290	56.242.290
RESULTADO ACUMULADO (\$)		-582.287.724			-124.289.058	-72.205.966	-18.736.475	37.505.815	93.748.105	149.990.395	206.232.684	262.474.974	318.717.264	374.959.554
CANAL HURTADO (%)		-			0	0	0	5%	20%	30%	30%	30%	40%	50%
PAGO A REGANTES	115.296.694	-			-	-	-	2.812.114	11.248.458	16.872.687	16.872.687	16.872.687	22.496.916	28.121.145
UTILIDAD INVERSIONISTA	299.662.860	-582.287.724			457.998.666	52.083.092	53.469.491	53.430.175	44.993.832	39.369.603	39.369.603	39.369.603	33.745.374	28.121.145
UTILIDAD ACUMULADA		-582.287.724			-124.289.058	-72.205.966	-18.736.475	34.693.700	79.687.532	119.057.135	158.426.738	197.796.341	231.541.715	259.662.860
VAN	131.292.546	-582.287.724			432.074.213	46.353.766	44.894.016	42.321.703	33.622.009	27.754.017	26.183.034	24.700.976	19.973.835	15.702.700
TIR														12,1%