

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

## Propuesta de Instalación sistema Pumped Storage en Zona agrícola

Trabajo de título para optar a al Título de  
técnico Universitario en MECÁNICA  
INDUSTRIAL

Alumno:  
Matías Matus de la Parra Cifuentes

Profesor guía:  
Ing. José Carvallo Basáez

Profesor Correferente:  
Ing. Cristian Rojas Sandoval

2020

## Resumen

El presente trabajo se enfocó en caracterizar la problemática que se da hoy en día en parcelas enfocadas a la agricultura en nuestro país, donde usualmente se encuentran ubicadas alejadas de las grandes urbes, lo que significa que la calidad de sus conexiones eléctricas suele ser menor, y además los tiempos de reposición también suelen ser mayores.

En busca de ayudar a solventar este problema, junto con hacer uso de la oportunidad para aportar al desarrollo tecnológico de la agricultura de nuestro país, se seleccionó un caso en la región de Valparaíso, específicamente en la ciudad de Quillota. Donde además se integró el concepto de riego tecnificado, el cual permite generar ahorros en agua, lo cual es punto relevante en plena escases hídrica.

El trabajo consideró cálculos de riego tecnificado en un caso desfavorable como es el verano, donde los requerimientos de agua son mayores y las necesidades energéticas también aumentan de manera considerable. Se calculó de forma aproximada la necesidad energética a cubrir y se detalló la cantidad de paneles fotovoltaicos necesarios para realizar un sistema de riego fotovoltaico, el que se apoyaría con sistema de pumped storage, de esta manera se podría plantear la reducción de la cantidad de paneles o simplemente permitir una mayor libertad en relación a las condiciones climáticas para la producción de energía con paneles solares.

Las condiciones estipuladas para el funcionamiento del pumped storage permitieron alcanzar cerca de un 20% del requerimiento de energía, pero en busca de condiciones más realistas de operación se recomienda plantear este tipo de sistemas para plantaciones de menor tamaño, o bien que las condiciones geológicas permitan instalar un proyecto que se adapte de mejor manera a los requerimientos de la plantación.

Índice

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción</b>                                        | <b>1</b>  |
| <b>Objetivos</b>                                           | <b>3</b>  |
| <b>Capítulo 1 : Antecedentes</b>                           | <b>4</b>  |
| 1.1 Sequía en Chile                                        | 5         |
| 1.2 Presentación de la problemática                        | 8         |
| 1.3 problemática energética y tecnológica                  | 12        |
| 1.4 Breve historia del riego                               | 13        |
| <b>Capítulo 2 : Comparación de soluciones alternativas</b> | <b>17</b> |
| 2.1 Pumped storage con generación fotovoltaica             | 18        |
| 2.2 Riego fotovoltaico                                     | 21        |
| 2.3 energía eólica                                         | 23        |
| 2.4 Generador a combustión interna                         | 26        |
| 2.5 Pila de hidrogeno                                      | 29        |
| 2.6 Conclusiones del capítulo                              | 33        |
| <b>Capítulo 3: Desarrollo de la solución</b>               | <b>35</b> |
| 3.1 Cifras a considerar                                    | 36        |
| 3.1.1 Frecuencia de riego                                  | 37        |
| 3.1.2 Riego de baja frecuencia                             | 38        |
| 3.1.3 Caudal y tiempo de riego en baja frecuencia          | 40        |
| 3.1.4 Riego en alta frecuencia                             | 41        |
| 3.2 Componentes riego fotovoltaico                         | 43        |
| 3.3 Consumo eléctrico de la bomba seleccionada             | 44        |
| 3.4 Selección de cantidad de paneles                       | 45        |
| 3.5 Turbina en pumped storage                              | 47        |

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| 3.6 Problemática de la selección de turbina | 50        |
| 3.7 Bomba centrífuga a seleccionar          | 52        |
| 3.8 Detalles de la instalación              | 53        |
| 3.9.1 Recomendaciones de mantenimiento      | 54        |
| 3.9.2 Recomendaciones de instalación        | 55        |
| <b>Conclusiones y propuestas de mejora</b>  | <b>57</b> |
| <b>Bibliografía</b>                         | <b>58</b> |

**Índice de Figuras**

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 Comparación promedio de lluvia 1981- 2010 vs julio 2019             | 6  |
| Figura 1-2 Vista aérea de la Zona                                              | 8  |
| Figura 1-3 Fuentes de agua superficiales en la Zona                            | 9  |
| Figura 1-4 Demanda y volumen sustentable sectores acuíferos Valle de Aconcagua | 10 |
| Figura 1-5 Regato existente en la propiedad                                    | 11 |
| Figura 1-6 Generación eléctrica mensual en la región de Valparaíso             | 12 |
| Figura 1-7 Caballos y tractores en los Estados Unidos en el siglo XX           | 15 |
| Figura 1-8 Producción mundial de alimentos en la post guerra                   | 16 |
| Figura 2-1 Esquema pumped storage                                              | 19 |
| Figura 2-2 Funcionamiento celda fotovoltaica                                   | 20 |
| Figura 2-3 Esquema instalación Fotovoltaica                                    | 22 |
| Figura 2-4 Esquema instalación eólica                                          | 24 |
| Figura 2-5 Funcionamiento efecto sustentación                                  | 25 |
| Figura 2-6 Partes de un generador                                              | 27 |
| Figura 2-7 Partes de un alternador                                             | 28 |
| Figura 2-8 Esquema instalación de pila de hidrogeno                            | 29 |
| Figura 2-9 Reacción química en la pila de hidrogeno                            | 30 |
| Figura 2-10 Funcionamiento de celda en pila de hidrogeno                       | 31 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-1 Ejemplo de ángulo de azimut e inclinación del panel   | 46 |
| Figura 3-2 Esquema central hidroeléctrica de bombeo              | 48 |
| Figura 3-3 Explicación características turbina Pelton            | 49 |
| Figura 3-4 Explicación características turbina Kaplan            | 49 |
| Figura 3-5 Explicación características turbina Francis           | 50 |
| Figura 3-6 Ejemplo curvas de operación modo bomba y modo turbina | 51 |
| Figura 3-7 Estimación rendimiento PAT                            | 52 |

## Índice de Tablas

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1-1 Volumen de agua sustentable en el valle del rio Aconcagua | 11 |
| Tabla 2-1 Matriz de comparación de soluciones                       | 33 |
| Tabla 3-1 Características de suelo según textura predominante       | 39 |
| Tabla 3-2 Resumen general de parámetros de riego                    | 42 |
| Tabla 3-3 Curvas de operación del panel fotovoltaico                | 44 |
| Tabla 3-4 Resumen perdidas en paneles fotovoltaicos                 | 47 |

## Siglas

|                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------|
| AC : Corriente alterna                                            |
| AD: Agua disponible por planta                                    |
| Ceh: Consumo energético horario                                   |
| Db: Demanda bruta del cultivo                                     |
| DC: Corriente directa                                             |
| Dga: Dirección General de Aguas                                   |
| Etc: Evapotranspiración del cultivo                               |
| INE: Instituto nacional de estadísticas                           |
| Nmod: número de módulos fotovoltaicos                             |
| OCDE: Organización para la cooperación y el desarrollo económicos |
| Odepa: Oficina de estudios y políticas agrarias                   |
| Pe: Potencia energética                                           |

Qpl: Caudal por planta

Rap: Requerimiento de agua por planta

RPM: Revoluciones por minuto

Tr: Tiempo de riego

**Simbología**

cm: centímetros

GWh: Giga watt hora

Ha: hectáreas

hr: Horas

L: Litros

m: Metros

m³: Metros cúbicos

m²: Metros cuadrados

mm: Milímetros

s: Segundos

W: watt

$\rho$  : Densidad

## Introducción

Si se hace el simple ejercicio de mirar al pasado y comparar de manera simplista los posibles cambios que han ocurrido en la sociedad, probablemente un detalle que destacaría de forma notoria cambio de población que se ha experimentado tanto a nivel mundial como a nivel nacional. Y es que datos censales de nuestro país reflejan como en los últimos 100 años la población se incrementó de cerca de 3 millones de personas en el año 1907, hasta los 15 millones en el año 2002[1], y cifras recientes pertenecientes al INE (instituto nacional de estadísticas) [2] indican que la población se encuentra sobre los 19 millones de personas.

De igual manera esta tendencia se refleja a nivel mundial variando ligeramente de país en país, y no es hasta tiempos recientes que se alzó la diferenciación entre países del primer mundo y países en vías de desarrollo, pues en estos últimos el crecimiento de la población se ha mantenido o aumentado en los últimos años, mientras que en las países del primer mundo se ve una tendencia totalmente distinta, donde la población simplemente tiende a mantenerse o incluso a disminuir (tendencia que se refleja en el envejecimiento de la población que grandes potencias han estado sufriendo e intentando aplicar distintas medidas en contra, con distintos grados de éxito).

Estos datos por sí solos ejemplifican a grandes rasgos una necesidad de incrementar la producción de alimentos, pero es que hace falta agregar como de influyente es el hecho de que a nivel mundial la calidad de la alimentación de las personas se ha mejorado de gran manera (factor importante en el aumento de la expectativa de vida), de tal manera que en países más pobres la cantidad media de calorías ingeridas ha aumentado. Sumado a esto, esta que las dietas en diferentes países alrededor del mundo se han hecho mucho más similares, haciendo uso de alimentos de mayor calidad y precio, esto influenciado en gran parte por el comercio internacional de alimentos y productos de carácter alimenticio [3].

De cara a esto es que muchos países del mundo, incluido Chile, tienen en su mira el año 2030 como meta para implementar medidas acordes a futuras necesidades productivas. Dentro de este marco es que la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), organismo perteneciente al Ministerio de Agricultura [4] ejemplifica en un estudio la complejidad de la meta de duplicar la exportación de alimentos de producción en Chile a el año 2030.

Dicha meta, si se analiza en relación a el entorno productivo de la actualidad se muestra como poco realista, ya que centrados en el área de la producción agrícola por ejemplo, son bastantes los factores que entran en juego si se desea duplicar la producción, factores que son difícilmente ajustables, tal como que el método más simple de aumentar dicho rendimiento a ese nivel sería incrementar la superficie cultivable acorde a la necesidad, pero, esto es

imposible por muchos motivos (la no disponibilidad de terreno, factores logísticos y de mano de obra por ejemplo).

Por este tipo de problemáticas es que es imperante explorar de forma activa nuevas maneras que permitan alcanzar un objetivo de tales proporciones. Pero independiente de todo lo anterior, claramente es necesario comenzar desde ahora a actualizar la infraestructura existente en el sector agrícola a nivel tanto de la producción en sí misma como de logística detrás de todos los procesos involucrados. La implementación de nuevas tecnologías que han aparecido (y abaratado considerablemente) en las últimas décadas, está demostrando su inmensurable capacidad de mejorar los procesos existentes en una gran cantidad de mercados productivos.

Además, no solo se trata de factores productivos donde hace falta la implementación de nuevas tecnologías, ya que en el marco de acuerdos internacionales a los que pertenece Chile como la OCDE, por ejemplo, se busca que dichos países pertenecientes sigan lineamientos en torno a redinamizar el crecimiento, asegurando las condiciones para un desarrollo sostenible [5]. Se establece principalmente entre esas condiciones la reducción activa la contaminación y fomentar la inversión en energías renovables como pilares fundamentales.

Es así como en las siguientes páginas a lo largo de este trabajo de título se desea plantear de la implementación de nuevas tecnologías que cumplan con los lineamientos establecidos tanto en el área de la producción agrícola como la reducción de la contaminación.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Diseñar un sistema híbrido “pumped storage” usando energía solar, generando ahorro energético y aumento de fiabilidad del sistema riego en zona agrícola perteneciente al valle de Quillota, acorde a la disponibilidad de componentes en el mercado nacional cumpliendo con el requerimiento basado en catálogos técnicos de los distintos componentes.

### Objetivos específicos:

- Describir estado hídrico y energético de la región de Valparaíso enfocado al área de riego agrícola y la evolución de las técnicas de riego a lo largo de la historia
- Comparar usando una matriz de decisión, en base a su aporte tecnológico, los posibles sistemas que contribuyan a tecnificar los procesos de riego en el país, aportando mayor eficiencia y fiabilidad.
- Definir sistema y sus componentes, generando a su vez una descripción de su instalación junto con un plan de mantenimiento.

## Capítulo 1: Antecedentes

## 1.1 SEQUÍA EN CHILE

La sequía es comúnmente definida como un estado temporal prolongado, en el cual existe una insuficiencia de agua, de manera que disminuye de manera considerable la cantidad de precipitaciones en una determinada extensión de terreno, mientras se mantiene o aumenta la evaporación de agua desde la superficie, de tal manera que se afecta de manera directa el balance hídrico de dicha extensión de terreno.

Las consecuencias más directas de la sequía son la falta de agua que afecta a las diversas fuentes de agua dulce como ríos o lagos, además afecta directamente a las reservas subterráneas de agua que no son capaces de recuperar los niveles habituales de agua ya que las pérdidas tanto naturales por escurrimiento como artificiales por uso de personas son significativamente mayores. Y en conjunto todos estos factores afectan y dañan tanto a la flora natural de la zona como a las actividades agrícolas ejecutadas ahí. Es importante diferenciar la sequía de la escasez hídrica, ya que ambos son conceptos relevantes en el contexto actual, ya que, si bien la sequía es producto de efectos naturales, la escasez hídrica se debe a factores y políticos que determinan la disponibilidad de agua.

Hablar de los motivos detrás de la sequía en Chile es bastante complejo, pues factores como el cambio climático tienen un rol primario hoy en día en el escenario mundial, donde el incremento de la temperatura del planeta ha afectado a todos los ecosistemas y se espera que en los siguientes años estos cambios se vuelvan aún más radicales. Sumado a la actividad del ser humano que, mediante el mal uso de la tierra y el exceso de deforestación, daña tremendamente la capacidad del suelo para absorber y retener agua. En adición a este tipo de factores humanos se agregan factores climatológicos naturales, y es que Chile se encuentra bajo la merced de fenómenos tales como La Niña y El Niño [6], donde el primero hace relación a periodos en los cuales domina la sequía en el país, y el segundo hace relación a periodos con un comportamiento totalmente distinto, es decir a periodos de lluvias prolongadas que conllevan inundaciones, crecidas fluviales y desbordamientos. Estos periodos en sí se tratan de cambios en la temperatura del aire y del mar, controlando así de manera marcada el clima en un territorio.[7]

Hace falta mencionar que durante los periodos en que alguno de estos fenómenos es preponderante, si bien existe una tendencia marcada de la cantidad de precipitaciones que existen, también se da el caso de que algunos periodos tengan un comportamiento totalmente distinto, pero esto solamente hace referencia a un estado temporal que no refleja el paso de un fenómeno a otro. Chile al ser un país que, además se encuentra distribuido a lo largo de una geografía bastante particular se ve afectado por como las corrientes interactúan con la

Cordillera de los Andes, conllevando así, comportamientos climáticos más bien aleatorios y difíciles de predecir aún con la tecnología actual.

En la figura 1 presentada a continuación, se muestra la evolución de las precipitaciones en promedio en milímetros durante periodo del año 1981 a 2010 en comparación a las precipitaciones del mes julio del año 2019 a lo largo del país. Demostrando de manera clara como la reducción de precipitaciones se ha presentado en el país durante los últimos años.

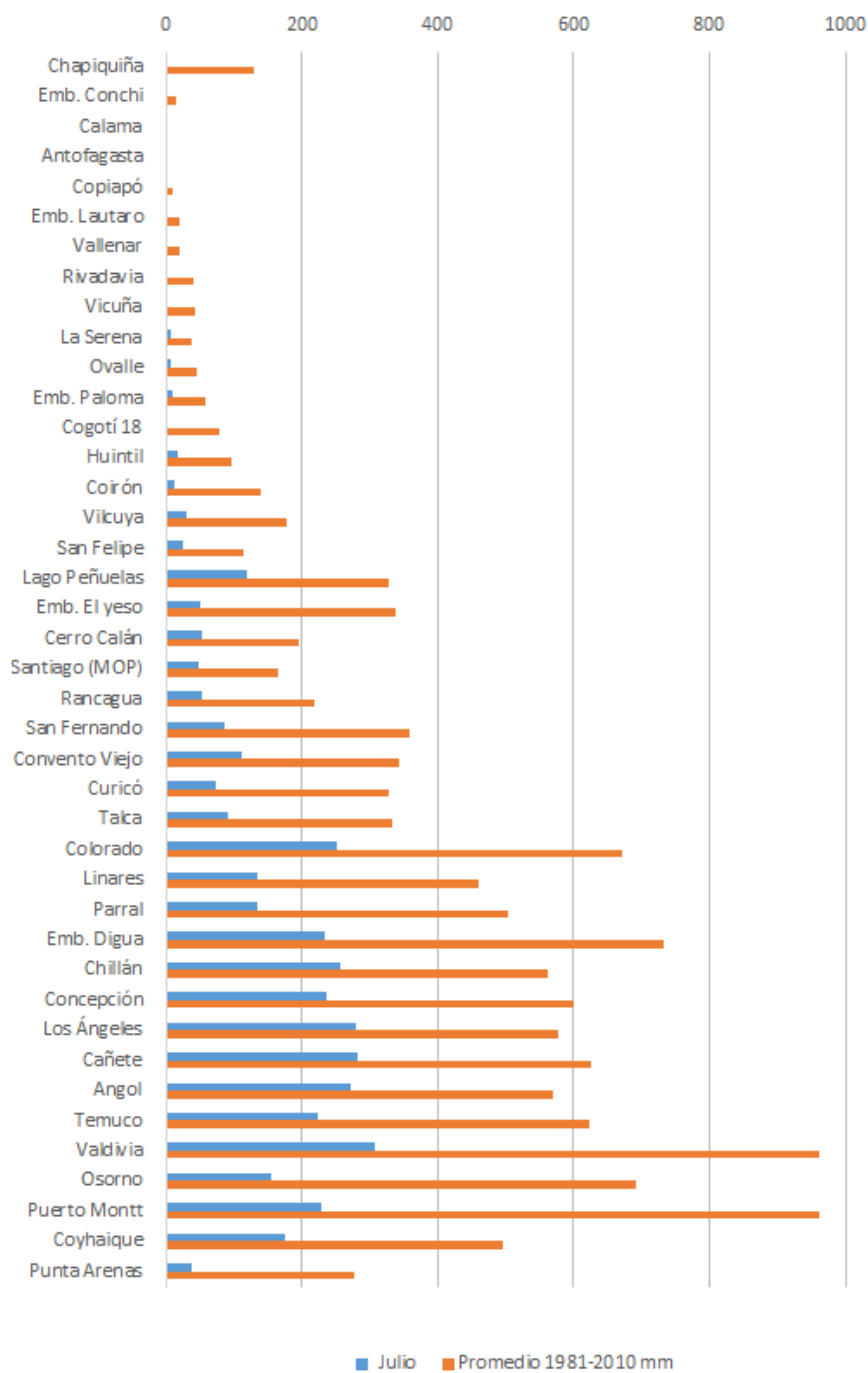


Figura 1-1: comparación promedio de lluvia 1981- 2010 vs julio 2019  
Fuente: Biblioteca del congreso nacional de chile [18]

Al centrarse en la escasez hídrica, el escenario es quizás más desalentador, ya que a simple vista parece ser un problema más fácil de solucionar, pero debido a la situación política actual del país no parece que vaya a cambiar en el tiempo próximo. Esto se debe a que en Chile la distribución del agua se decide según el código de aguas, instaurado en los años 80, el cual estipula la existencia de derechos de agua para uso comercial, [8] donde básicamente se crea un mercado en el cual se paga por acceso a cierta cantidad de agua que se mide en m<sup>3</sup> de la disponibilidad de agua.

Este método genera problemas en la distribución del derecho de agua, ya que compradores con un mayor capital para invertir pueden disponer de mayor parte de la cantidad de agua disponible para sus operaciones, contribuyendo a la escasez del recurso hídrico para los pequeños grupos agrícolas que por no tener una pierden acceso a agua. Este mercado también menciona los acuíferos subterráneos de los cuales se puede obtener agua, pero ya que estos dependen tremendamente de fuentes de llenado que devuelvan su nivel normal, no necesariamente son fuentes confiables.

Como se comentó anteriormente, la naturaleza de este problema es en mayor parte política, esto debido a que el sistema en general debería funcionar, y ha demostrado funcionar en otros países en cierta medida, pero debido a falta de intervención el problema se ha mantenido estático en las últimas décadas, y no es hasta ahora que producto de presiones internacionales se están buscando maneras más realistas de afrontar el problema, con todavía bastante tiempo faltante para comprobar algún grado de éxito o fracaso. Y es en adición a este problema que Chile se encuentra con un marco legal anticuado, según señala el hidrogeólogo Raúl Campillo [9], actualmente se habla netamente en términos de sequía haciendo referencia a las diferencias de precipitaciones de un año a otro, pero, en realidad hace falta hablar de escasez, lo que se busca con este cambio de concepto es tener en cuenta además de la variación de las precipitación también la demanda de agua, tanto para consumo de la población como para uso industrial, ya que ambas crecen año a año afectando directamente la disponibilidad del recurso hídrico del país. Esto se ve reflejado como a día de hoy los últimos informes de la Dirección General de Aguas [10], muestran claramente un fenómeno de sobre venta de los derechos de agua en el país, y aun así las medidas tomadas por parte del gobierno fallan en abordar completamente el problema.

En base a esto que realizó la elección de problemática ubicada en el valle de Quillota, al ser una de las zonas del país que concentra la producción agrícola de frutas y hortalizas, con la palta ( persea americana) como uno de sus productos principales, y a corto plazo será una de las zonas más afectadas por la sequía, siendo un punto interesante para aplicar nuevas tecnologías con el fin de cumplir con la meta de producción fijada por el Ministerio de Agricultura.

## 1.2 PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Como locación en la cual se desea solucionar un problema, se ha decidido una perteneciente a la región de Valparaíso, pues al ser una de las principales regiones del país en tanto a nivel de población, como importancia para la producción de diversos productos agrícolas, los cuales se comercializan dentro y fuera del país.

Se ha seleccionado una plantación de paltos ubicada en dirección a Quillota, Quinta Región. Específicamente en el sector de San Pedro, a un costado de la Ruta 64, ruta de alta afluencia que une las ciudades de Viña del Mar y la ciudad de Quillota.



Figura 1-2 : Vista aérea de la Zona

Fuente: Google maps

Este terreno cuenta con un área de 10 hectáreas, de las que resta un área aprovechable para ejercer el cultivo de paltos de 8 hectáreas, en el cual se cultivan exclusivamente paltas (*Persea americana*) de la variedad originaria de Chile llamada Hass. El palto es un árbol de origen en

América central, de hoja perenne y que es capaz de alcanzar alturas de hasta 12 metros. Los paltos están plantados bajo el método de surcos, este es conveniente debido a que se ubican los paltos en la parte superior del surco con lo que se logra una absorción más eficiente del agua, ya que evita perdidas por evaporación y aprovecha el agua de escurrimiento. El método utilizado para regar es el método de goteo, en el cual trae beneficios en relación con el aprovechamiento de agua y además de un uso eficiente de energía.

Aproximadamente, según estimaciones de ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias) que forma parte del Ministerio de Agricultura[11], la densidad de paltos que puede haber por hectárea es de 416 (cantidad más común usada en la región, aunque dependiendo del nivel de tecnificación puede ser una cantidad más alta[12]), lo que daría como un máximo teórico, producto de una multiplicación simple de área cultivable y cantidad de cultivo por unidad de área, de 3300 paltos en las 8 hectáreas con las que cuenta el terreno. También el documento de la ODEPA detalla que el rendimiento promedio anual por hectárea equivaldría a 10500 kg, usando el mismo método de cálculo, una multiplicación de producción por área total, se obtiene la estimación de una cantidad de 84000 kg de paltas en promedio durante un año en la totalidad del terreno cultivable.

Como se puede apreciar en la figura 2, esta ubicación se caracteriza por estar en una zona productiva altamente enfocada al sector agrícola, se presupone que esto es debido a la facilidad de interconexión entre distintas ciudades de la que goza la zona, como se mencionó anteriormente, esta ubicación se encuentra a un costado de la ruta 64, y a escasos kilómetros de la ruta 60, la cual une Valparaíso con Los Andes, e incluso continúa en dirección a Argentina. Además, cabe destacar que estas importantes interconexiones le permiten acceder de manera sencilla a Santiago, capital de Chile.

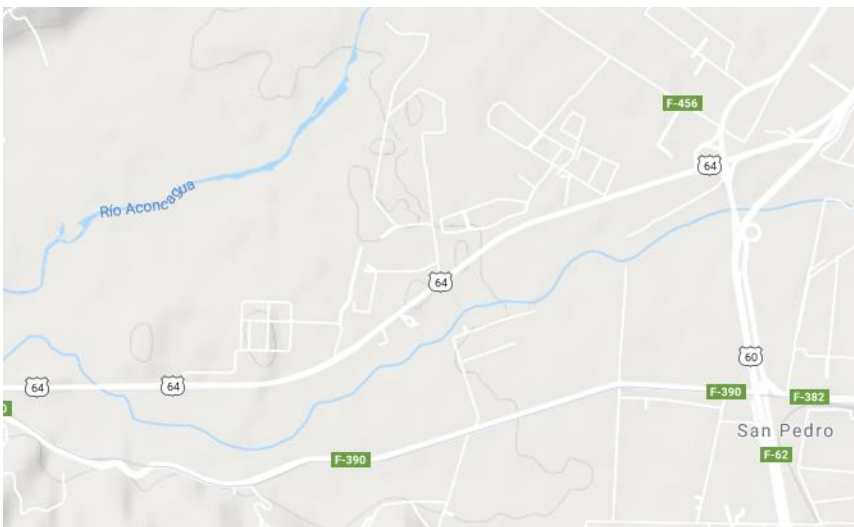


Figura 1-3: Fuentes de agua superficiales en la Zona  
Fuente: Google maps

Junto a esto, esta zona se encuentra estratégicamente cerca del río Aconcagua, uno de los principales ríos de la región, además, por el lado posterior se encuentra el estero San Isidro, el cual algunos kilómetros después se integra al río Aconcagua. Esto históricamente les dio un acceso privilegiado a fuentes de agua para llevar a cabo la producción de paltas (figura 3).

Producto de la constante sequía que se ha mantenido durante más de una década en la región, Se ha desarrollado en una considerable reducción del caudal que corre por el rio Aconcagua, tanto así que este actualmente no es más que una sombra de lo que solía ser. Este fenómeno también se ha mostrado cruelmente en el estero San Isidro, que se mantiene prácticamente seco, con excepción de la temporada de invierno donde corre un débil cauce. Según un estudio de la DGA realizado en 2015 [13], un volumen sustentable de uso de agua en los sectores acuíferos del Valle de Aconcagua debería ser aproximadamente 280 millones de m<sup>3</sup> al año, pero en realidad la cifra de la demanda a fecha del estudio es de aproximadamente 750 millones de m<sup>3</sup> al año, resultando en un uso de alrededor de un 260 % en comparación con la cifra recomendada como sustentable, como se demuestra en la figura 4.

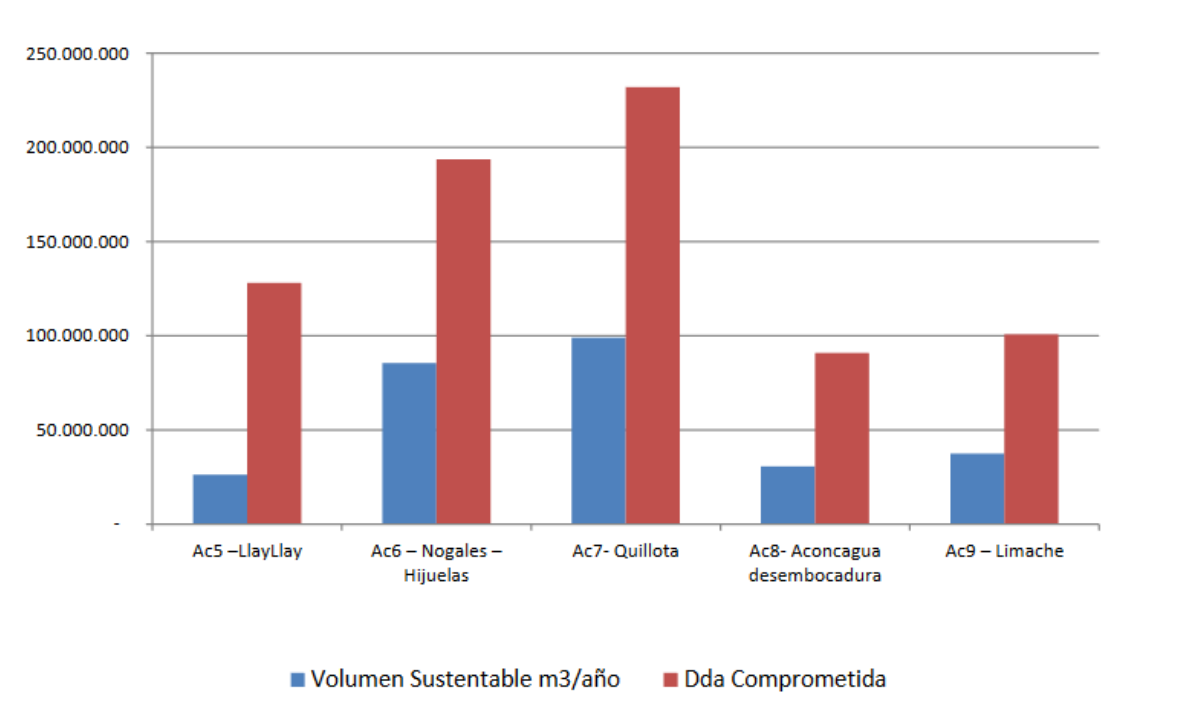


Figura 1-4: Demanda y volumen sustentable sectores acuíferos Valle de Aconcagua  
Fuente: Determinación disponibilidad de aguas Valle del Rio Aconcagua, DGA[13]

Esto ha impactado de forma severa en las fuentes y accesibilidad del agua en la zona, como se muestra en la figura 4 , el cultivo es rodeado por un delgado regato, el cual se presupone proviene desde el estero San Isidro, pasando por una serie de terrenos agrícolas cercanos,

pero este regato al igual que el estero se mantiene seco durante la mayor parte del año, y con un escaso caudal en temporada de lluvias.



Figura 1-5: Regato existente en la propiedad  
Fuente: Google maps

- Pozo ubicado en el terreno
- Regato proveniente de estero San Isidro

Además, hay un pozo el cual se utiliza en mayor medida para realizar el riego de la plantación, lamentablemente no hay datos específicos sobre la profundidad de este, ni el volumen de agua, ni el ritmo al cual este se rellena de forma natural, ya que esos datos no fueron cedidos por la empresa. Pero según el estudio de la DGA de 2015 [13], el promedio de agua subterránea en la región equivale a más de 99 millones de m<sup>3</sup>, como se muestra en la tabla 1, esto repartido por una totalidad de 1523 pozos activos a la fecha de realización del estudio, a partir de estas cifras se puede establecer que en promedio los pozos en la zona de Quillota poseían en torno a 65000 m<sup>3</sup> de agua por año. Claramente producto de la crisis hidrológica reinante esta cifra se debe haber reducido ligeramente, pero sirve como cifra para contextualizar la disponibilidad de agua en la zona.

Tabla 1-1 Volumen sustentable de agua en Valle del Rio Aconcagua

| Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento común | m <sup>3</sup> /s | Volumen Sustentable m <sup>3</sup> /año |
|------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| Acuífero 5 -LlayLlay                           | 0,83              | 26.174.880                              |
| Acuífero 6 - Nogales - Hijuelas                | 2,71              | 85.462.560                              |
| Acuífero 7- Quillota                           | 3,14              | 99.023.040                              |
| Acuífero 8- Aconcagua desembocadura            | 0,97              | 30.589.920                              |
| Acuífero 9 - Limache                           | 1,19              | 37.527.840                              |

Fuente: dirección general de aguas [13]

### 1.3 PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA Y TECNOLÓGICA

Chile como país en vías de desarrollo se ha mantenido constantemente mejorando su red eléctrica durante las últimas décadas. Esto es especialmente cierto en regiones con alta densidad de población como la región Metropolitana y la región de Valparaíso, y es en esta última como objetivo de interés de este estudio, que, a día de hoy, según cifras del ministerio de energía [14], existen alrededor de 870000 clientes regulados.

Y estos constituyen una generación mensual de electricidad en la región de 1070 GWh, de la cual un 60% se produce en base a gas natural y un 30 % en base a carbón. Entre el porcentaje restante solo un 2% se produce por energía fotovoltaica como se representa en la figura.

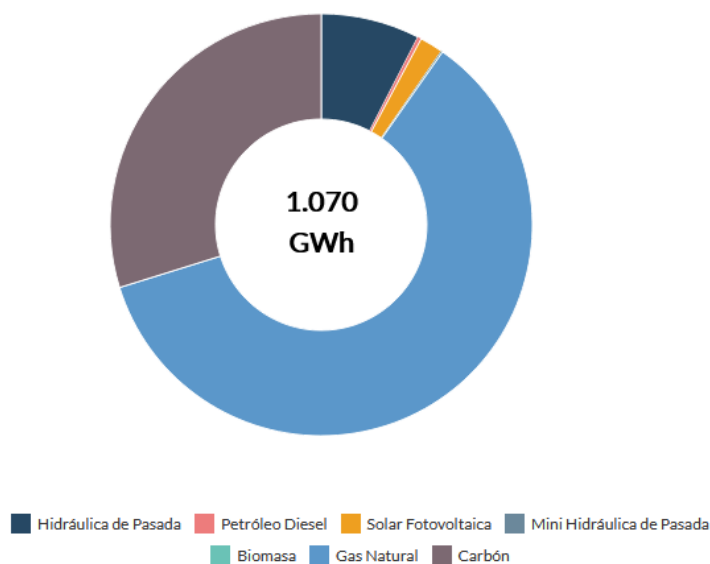


Figura 1-6 : Generación eléctrica mensual en la región de Valparaíso  
Fuente: Comisión Nacional de Energía, Ministerio de energía [14]

Además, en base a cifras del Ministerio de Energía, en la región la interrupción promedio del suministro al año alcanza las 10,1 horas. Esto lamentablemente no refleja la situación que, de las comunas rurales en la región, ya que, al ser sectores de producción agrícola, naturalmente se encuentran relativamente alejados de los centros donde se concentra la población como las ciudades. Traduciéndose, así en un servicio que tiene caídas del servicio superiores al promedio y a su vez tiempos de reposición mayores impactando muchas veces en las actividades agrícolas mismas que se desarrollan en esas áreas.

Y en esto que se contradice con las metas impuestas por el ministerio de agricultura, que busca duplicar la producción agrícola al año 2030, algo que con una red eléctrica poco confiable se complica considerablemente. Hoy en día muchas de las plantaciones productivas del país, incluida la mencionada anteriormente, no poseen los recursos tecnológicos para llevar a cabo dicho masivo incremento de producción. Todavía se encuentran haciendo uso de técnicas de varias décadas de antigüedad, las cuales se ven afectadas directamente por problemas existentes en la red eléctrica y que pueden mermar la productividad.

De igual manera en el caso de estudio, por ejemplo, el riego es supervisado y operado por un trabajador, el cual falla constantemente en realizar su labor, impactando directamente la condición de los cultivos. Si bien la solución más simple es reemplazarlo por otro, esto se presenta como una oportunidad de tecnificar el riego, donde no solo se busque aumentar el rendimiento de la producción, sino que se busque generar ahorros en energía a la vez que se implementa una mejora en la confiabilidad del suministro.

Además, en un mercado de importaciones cada vez más competitivo, se presenta como oportunidad para desarrollar una solución de carácter más sostenible, que aporte también al producto en sí, pues en los últimos años se generó la tendencia, especialmente en países del primer mundo, de buscar productos orgánicos y con una menor huella de carbono.

Como planteamiento preliminar de solución al problema, se busca proponer un sistema de pumped storage, el cual utiliza paneles solares para captar energía proveniente del sol, y usar esta misma para bombear agua desde una fuente de agua, como un pozo, para fines de riego, pero además dirigir una porción de esta agua hacia a un estanque de almacenamiento. Este último cumple la función de batería, ya que esa agua conforme sea necesaria más energía, se hará fluir hacia una turbina y luego de vuelta a el pozo. Además, se busca la integración de equipos como un variador de frecuencia que permita ahorros tanto en energía como en agua.

A modo de ejemplificar los requerimientos de este sistema, el palto anualmente consume entre 7000 y 16000 [m<sup>3</sup>/ha] al año, usando fórmulas que se explicaran más adelante en el desarrollo de este trabajo, daría un requerimiento eléctrico aproximado de 1800 [Kw] al año.

## **1.4 BREVE HISTORIA DEL RIEGO**

A grandes rasgos cuando se habla de riego, se habla de la práctica de aplicar agua, que de forma natural no sería aplicada, al suelo para hacer crecer de mejor manera una planta o cultivo determinado.

Históricamente los primeros asentamientos humanos en su gran mayoría se caracterizaban por estar situados cerca de una fuente de agua, pues esta es absolutamente necesaria para la vida. Pero conforme dichos asentamientos fueron creciendo, se vieron en la necesidad de expandir su fuente de alimento, frente a esto las técnicas de cultivo ejercidas hasta el momento, donde hacían uso en su mayoría de la humedad del suelo, no daban abasto.

Según estudios arqueológicos llevados a cabo en las últimas décadas, se ha demostrado como aquellos primeros asentamientos de indígenas en Chile, varios siglos previos al inicio de la era cristiana, si bien hicieron extenso uso de técnicas básicas de cultivo, debido a la accidentada geografía de Chile en los diversos valles de la zona Norte, en conjunto a fuertes influencias de sociedades más avanzadas, provenientes del norte del continente, como el imperio inca, se comenzó a implementar diversos métodos de cultivo que hacían uso de técnicas de desplazamiento de agua y formación de terrazas que permitían la diversificación de la producción agrícola. A medida que pasó el tiempo estas técnicas fueron extendiéndose a lo largo de diversos asentamientos existentes en aquella época en dirección al sur de la geografía que hoy conforma nuestro país.

No es hasta el periodo de la colonia, que, bajo la influencia española, se generaron proyectos de mayor envergadura, generando canales desde los principales ríos del país y diversos, para satisfacer las crecientes necesidades hídricas debido al aumento de la actividad agrícola. Esto se mantuvo igual incluso durante la llegada de un Chile independiente.

Los verdaderos avances en agricultura no serían vistos hasta comienzos del siglo XIX en Europa, donde se desarrolló uno de los cambios económicos y sociales más grandes jamás vistos, la revolución industrial. Durante este periodo se produjo un cambio gigantesco, donde la economía dejó de basarse en agricultura y paso a basarse en la fabricación industrial, trayendo consigo innumerables cambios a la sociedad de la época [15]. Por supuesto que aquellos cambios fueron especialmente notables en la producción agrícola, donde el número de pequeños productores se redujo considerablemente (producto de la migración de la población hacia las ciudades), en busca de aumentar la producción de alimentos fue que se comenzaron a utilizar nuevas técnicas en cultivos, incorporando el uso de nuevos fertilizantes químicos que obtenían resultados bastante superiores a los fertilizantes naturales utilizados hasta la fecha, de igual manera el uso de nuevas máquinas para arar la tierra que reemplazaban el uso de ganado para esas labores generando un cambio significativo en como interaccionaba la agricultura y ganadería de la época.

Estos cambios se mantuvieron en movimiento durante el resto de ese siglo, progresando y expandiéndose lentamente en la Europa de la época.

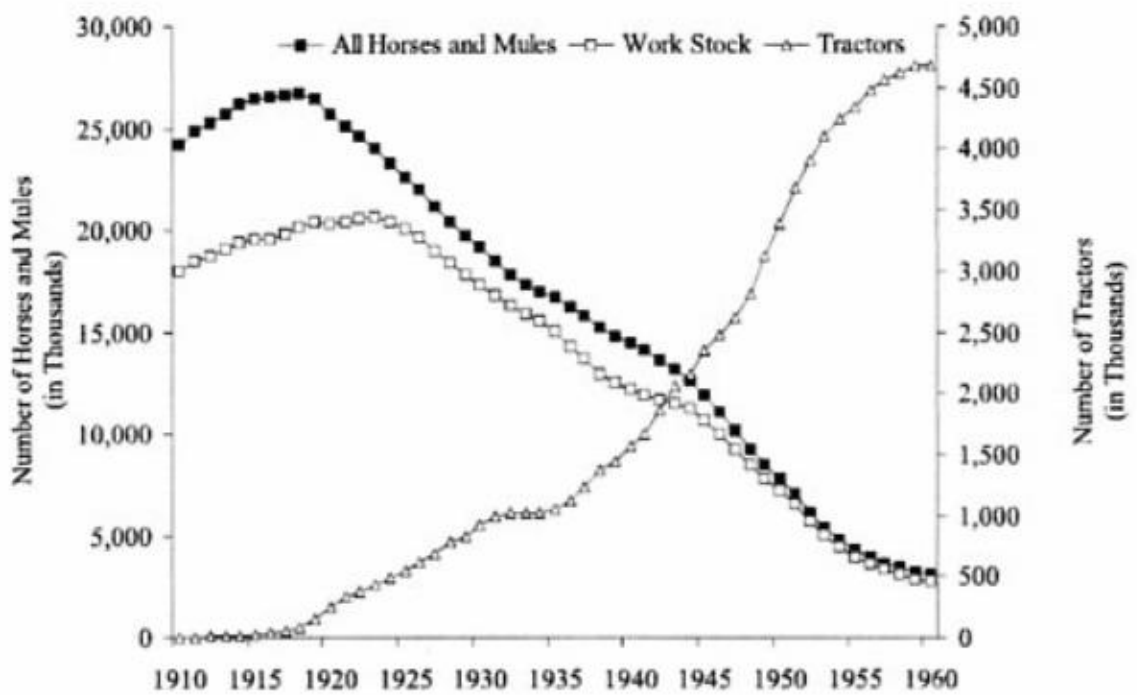


Figura 1-7 : Caballos y tractores en los Estados Unidos en el siglo XX

Fuente: La industrialización de la agricultura, Fernando Collantes [15]

Con el empezar del siglo XX se produjeron las más grandes guerras de la historia, la primera y segunda guerra mundial, sucesos bélicos de esta escala requieren de muchos recursos de todo tipo, especialmente monetarios y humanos, esto se tradujo en una reducción de la producción de productos agrícolas y posteriores racionamientos en los países en conflictos [16], por supuesto esto no afectó a países de América Latina, los cuales mantuvieron su producción estable durante ese periodo de tiempo. Pero, al terminar esos conflictos muchos países de Europa se encontraron con un déficit importante en su cantidad de alimentos. Con el fin de enfrentar esta crisis, muchos países se enfocaron en fomentar la agricultura, haciendo uso de los avances tecnológicos desarrollados durante la guerra se aplicaron, a grandes rasgos hubo avances en el aprovechamiento de aguas, aumentar la tierra propicia para plantar, velar por la fertilidad del suelo, luchar contra plagas y enfermedades de las plantas, junto con un proceso de selección de semillas e inversión y desarrollo de nueva maquinaria Agrícola.

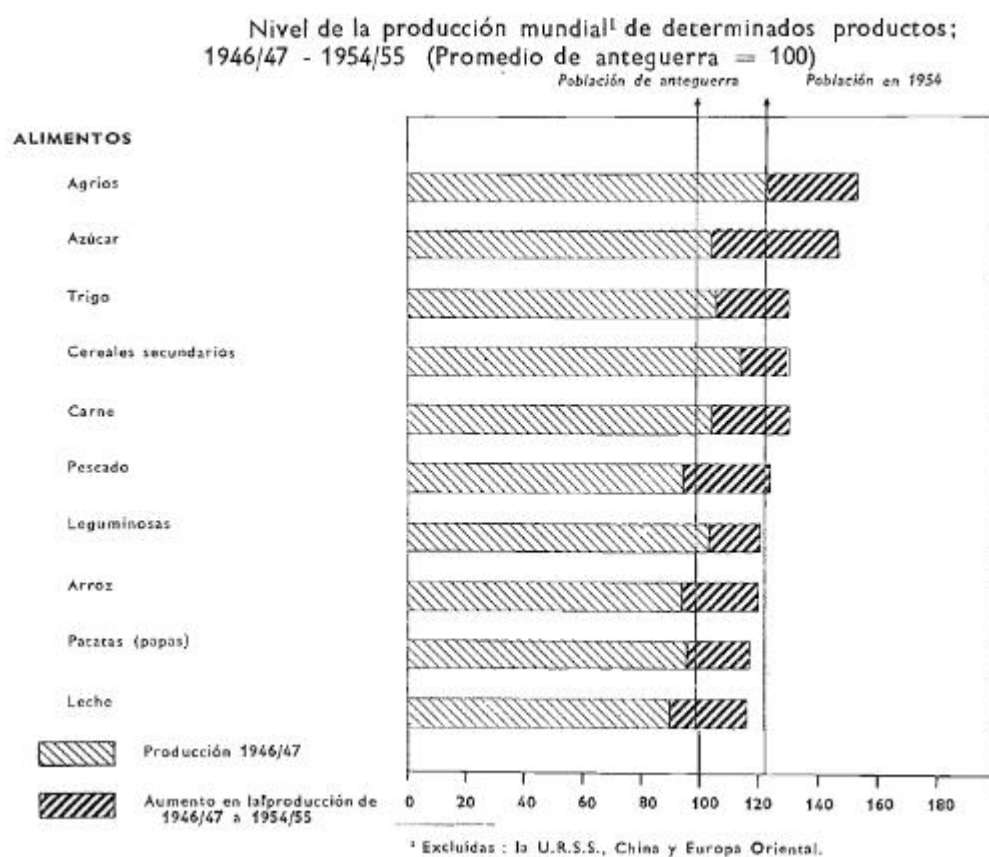


Figura 1-8: producción mundial de alimentos en la post guerra  
Fuente: La industrialización de la agricultura, Fernando Collantes [15]

Por su parte Chile a inicios del siglo XX, se mantenía en un auge minero importante[17], pero producto del surgimiento del salitre sintético durante el intermedio entre ambas guerras mundiales se produjo la paralización de salitreras del norte grande, conduciendo nuevamente un desvío de la fuerza laboral hacia las principales zonas de producción agrícola del país, generando así la necesidad no solo de abastecer con agua los campos, sino que repartir dicha agua, de tal manera que se generaron concesiones y proyectos para la construcción de diques que permitían almacenar una gran cantidad de agua durante los meses de invierno y primavera, para ser usada durante el verano. Junto con esto comenzó la integración de las nuevas tecnologías provenientes de Europa en aquel periodo.

## Capítulo 2: Comparación de Soluciones alternativas

Metodología a utilizar: Como parte de este capítulo, en el cual se busca definir posibles soluciones a la problemática, y además compararlas, primero se explicará como un todo el funcionamiento del sistema y luego se desglosará cada posible propuesta en diferentes subsistemas, los cuales serán explicados individualmente. Mencionando además posibles ventajas y desventajas según corresponda. En el caso de los subsistemas que se repitan no serán mencionados nuevamente, ya que no aportan al desarrollo del objetivo planteado para este capítulo, por ejemplo, temas relacionados a las instalaciones de riego en sí mismas son dependientes del tipo de plantación. Luego al final del capítulo se condensará todo en un resumen recopilatorio.

La problemática para solucionar en este trabajo es mejorar la confiabilidad y auto sustentabilidad energética de sistemas de riego, ya que es común que, en áreas rurales, alejadas de las urbes los cortes eléctricos puedan afectar directamente los ciclos de riego.

## **2.1 PUMPED STORAGE CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA**

Si se establece un planteamiento de un sistema integral el Pumped Storage con generación Fotovoltaica es ciertamente muy interesante, pues esta propuesta funciona mediante la utilización de una serie de paneles fotovoltaicos como fuente de energía, la cual es recolectada durante el día, para luego hacer tanto uso de esta para impulsar una bomba para riego, y además en horas en las cuales no exista necesidad de realizar riego enviar agua hacia un estanque de almacenamiento, esta agua se envía con el único fin de que se use posteriormente para generar energía, esto porque haciendo uso de la energía potencial que adquiere el agua al caer se puede accionar una turbina. Actuando, así en términos simples como una batería cuando el sistema fotovoltaico no sea capaz de proporcionar toda la energía necesaria, el beneficio de este tipo de instalación es que como la energía usada es proporcionada por el sol, es una de las baterías con menor costo para el almacenamiento de energía

En resumen, este sistema funcionaría de igual manera que un sistema de riego fotovoltaico convencional, pero tendría la posibilidad de almacenar energía sin recurrir a baterías de litio o similares que son utilizadas en algunas instalaciones que incrementan los costos y el posible mantenimiento.

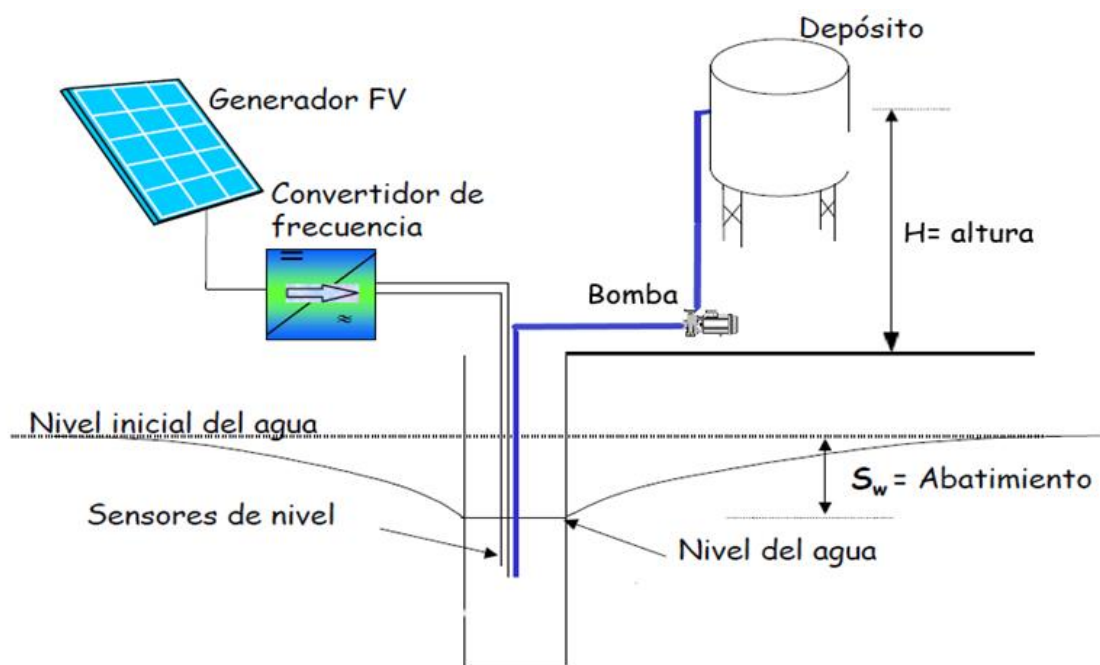


Figura 2-1: Esquema pumped storage

Fuente: optimización del uso de convertidores de frecuencia con bombas centrífugas y motores trifásicos en sistemas de bombeo fotovoltaico [22]

Subsistema de generación de energía: Este subsistema consiste en una serie de paneles fotovoltaicos, los cuales generan la electricidad para hacer funcionar el sistema. La cantidad de paneles y la disposición de estos dependen mayoritariamente del requerimiento energético necesario [19]. Cada panel fotovoltaico está formado por un conjunto de células las cuales actúan como un diodo, se conforma tal que hay un elemento semiconductor ubicado en la célula del panel [20], se usa ese semiconductor ya que la energía de unión entre los electrones de valencia y el núcleo de sus átomos es similar a la energía proporcionada por los fotones de los rayos solares. En base a esto, es que cuando los fotones producidos por la radiación solar inciden sobre el semiconductor los enlaces que existen entre sus electrones de valencia y el núcleo se rompen dejando así a dichos electrones moverse libremente [21].

Para generar la reacción llamada Efecto Fotovoltaico, hace falta incluir en el panel dos capas de este silicio, una capa expuesta a la luz con un tratamiento químico para quedar con carga negativa (N) y la otra capa con otro tratamiento químico para quedar con carga positiva (P) y entre capas se forma un campo eléctrico que dificulta la recombinación.

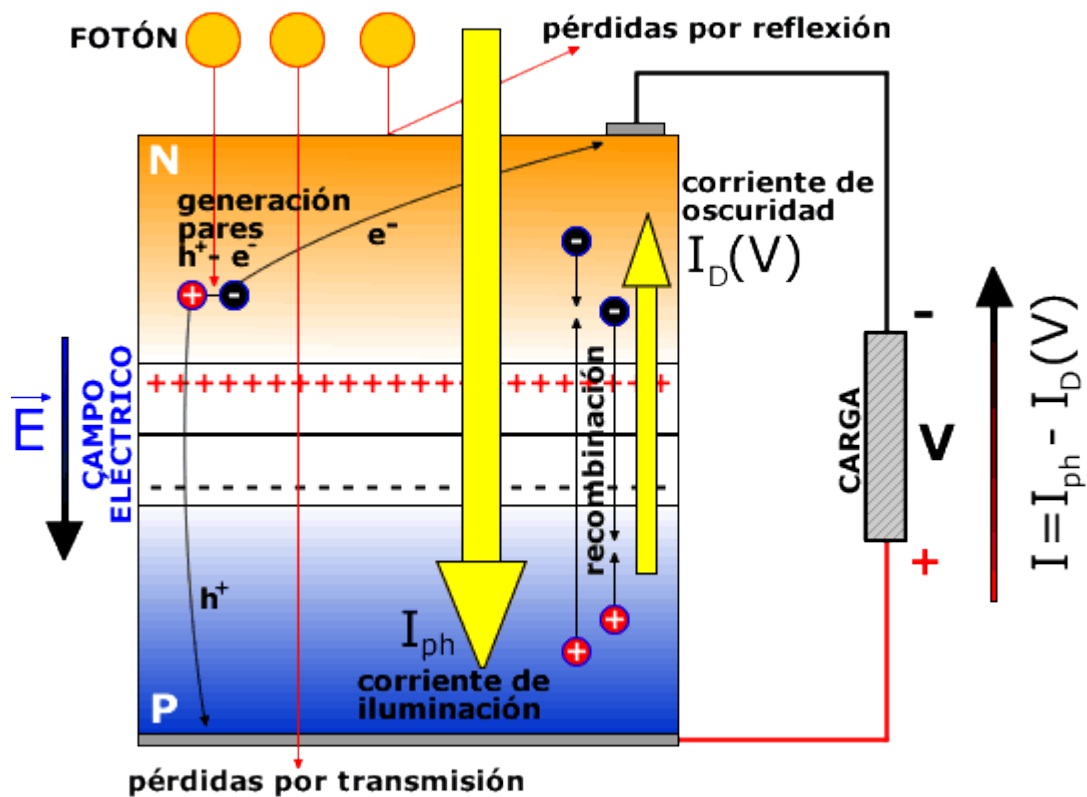


Figura 2-2: funcionamiento celda fotovoltaica  
Fuente: “Curso solar”, Universidad de Jaén[20]

Subsistema de Bombeo: Esta conformado por tanto la bomba / turbina a cargo de tanto mover la masa de agua desde el pozo a el estanque de recolección, y de igual manera este encargado de generar energía a partir del flujo de agua desde el estanque a el pozo. Este subsistema es potenciado por un motor, el cual puede ser AC o DC.

Subsistema de recolección: Este subsistema cumple la función de almacenar agua en el estanque de recolección, con el fin de ser capaz de generar energía durante periodos en el cual el sol no es suficiente para generar la energía necesaria. La altura a la cual se encuentra el estanque determinará cuanta energía se puede generar en dichos casos.

Subsistema de acondicionamiento: Este subsistema es altamente dependiente de la bomba con la cual se equipe el sistema, ya que se encarga de hacer la conversión de corriente necesaria proveniente desde los paneles fotovoltaicos a la bomba. Además, fija el valor de la tensión a la cual funciona el sistema.

Es recomendable incorporar a el sistema un variador de frecuencia [22] que regule el sistema de riego, ya que de esta manera permite obtener un mayor rendimiento, tanto energético como en relación con el ahorro de agua. Un control preciso de las bombas a utilizar es un factor

clave en las mejoras de los sistemas de riego que se espera incorporar en mayor medida en los próximos años.

En términos de ventajas de este tipo de sistemas, se encuentra el hecho de que pueden operar completamente desprendidos de la red eléctrica, lo que se transfiere en ahorros monetarios al largo plazo por el no consumo eléctrico, además aumenta considerablemente la confiabilidad del sistema, pues opera de forma independiente de una distribuidora de electricidad. Otro factor que aporta a la confiabilidad es que este tipo de instalación requiere muy limitado mantenimiento. Entre las posibles desventajas que este tipo de sistemas podría traer consigo, esta que el costo inicial tiende a ser alto, poniendo así una barrera económica para la adquisición de la instalación, pero como muestra la tendencia de los últimos años el precio de componentes como los paneles se mantiene a la baja. Otra desventaja para considerar es el hecho que, en meses de invierno con días más cortos y cielos nublados más frecuentes, la cantidad de energía posible a generar diariamente disminuye considerablemente.

Finalmente la principal desventaja a considerar es el hecho de que como se mencionó antes el pumped storage trabaja con agua, lo que hace que sea afectado por las bajas extremas de temperatura, por lo que zonas donde las temperaturas ambientales pueden bajar sobre 0° es posible que inhabilite el funcionamiento del sistema, aunque es posible agregar algún tipo de anticongelante para prevenir esto, se generarían cambios en la densidad de líquido y por lo tanto cambiaría la capacidad de generar energía de la turbina.

## **2.2 RIEGO FOTOVOLTAICO**

El riego fotovoltaico es muy similar al método mencionado anteriormente, pues comparten el funcionamiento tal que se usa energía generada a partir del sol para potenciar una bomba que extraerá agua desde un pozo. Este tipo de sistemas se están volviendo muy populares debido a la constante baja del precio de los paneles solares que ha experimentado el mercado en la última década, esto por supuesto sumado a considerables mejoras de rendimiento.

A modo de ejemplo de esto último, es destacable mencionar como en Europa, en un proyecto conjunto realizado por varias universidades de 5 países se desarrolló MASLOWATEN [23], el cual consistió en desarrollar instalaciones de riego fotovoltaico que logran generar ahorros en agua manteniéndose completamente funcional a partir de energías renovables, lo que significa que reducen de forma considerable el costo energético.

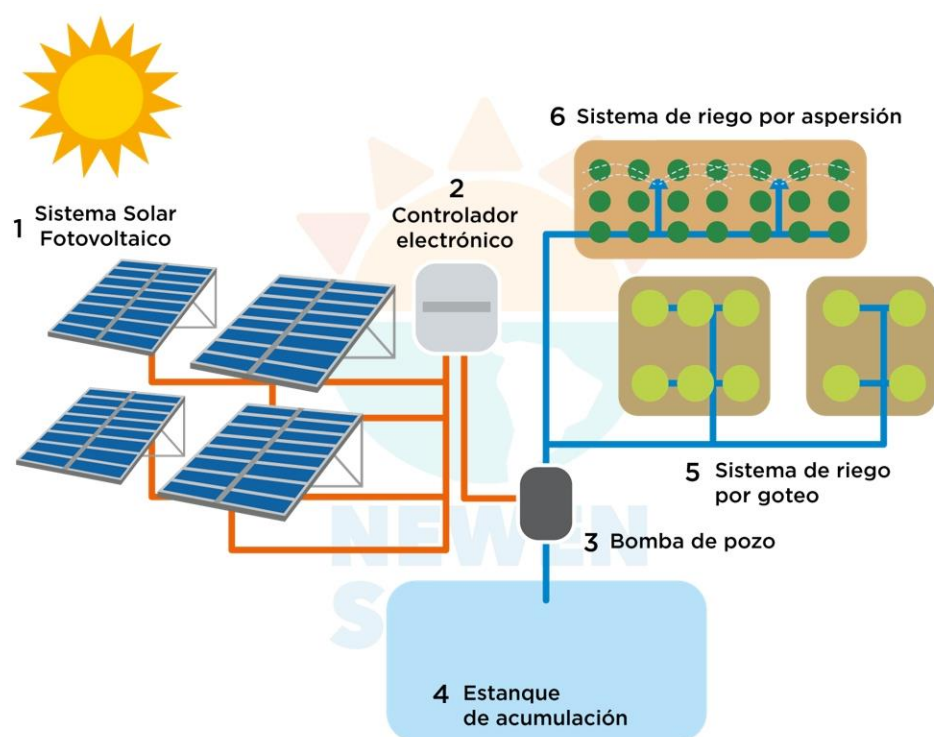


Figura 2-3: Esquema instalación Fotovoltaica.

Fuente: newensolar [33]

Al hablar de los posibles subsistemas que componen una instalación de riego fotovoltaica se hace evidente el hecho de que comparte la gran mayor parte de sus componentes con el antes mencionado pumped storage. Entre estos subsistemas que comparten esta el de generación de energía, el de acondicionamiento, y el de bombeo, pero este último está solamente enfocado a bombear agua hacia las plantaciones. Se diferencian básicamente en lo relacionado a el almacenamiento de energía, ya que es común la utilización de baterías de ion-litio como dicha fuente de almacenamiento. O inclusive en algunos casos se salta completamente el almacenamiento y solo se utiliza la energía disponible durante una porción del día.

En términos de ventajas de este tipo de sistemas, claramente comparte con el punto anterior los beneficios inherentes de usar el sol, como recurso prácticamente inagotable, para generar energía, tal como que, a parte del costo de la instalación, este sistema no tiene costos de operación y muy poco mantenimiento. Otra ventaja a considerar es que constantemente se abarata esta tecnología y además aumenta su disponibilidad en el mercado nacional. Por el otro lado, si se habla de desventajas surgen unas cuantas a considerar, primeramente la dependencia de la aleatoriedad de la luz solar, y en relación a esto, si se desea almacenar alguna parte de esa electricidad generada se debe recurrir a el uso de baterías, las cuales tienen un alto costo y poca duración de vida( dependiendo del tipo y tecnología de la batería) y

finalmente a día de hoy un problema relevante es la eficiencia con la cual operan los paneles fotovoltaicos, en el mercado existe una gran variedad de materiales con los cuales se hace la célula del panel, y según cual material conductor se utilice se obtendrá un rendimiento y precio diferente, en conjunción con esto es que hay que mencionar que a día de hoy con las mejores tecnologías disponibles en el mercado se puede alcanzar una eficiencia que ronda en el 20 % [24] en el mejor de los casos.

## **2.3 ENERGÍA EÓLICA**

En relación con la producción de energía limpia y sustentable, existen a día de hoy una gran variedad de métodos, pero sin duda entre los más destacados está el antes mencionado método fotovoltaico, y la generación de energía eólica.

Esta última es usada en grandes cantidades en muchos países del mundo, ya que se caracteriza por depender del viento, un recurso prácticamente inagotable y fácil de obtener al igual que en el caso de la luz del sol. El funcionamiento de este tipo de sistemas se basa en la utilización de la energía cinética obtenida de una masa de aire en movimiento, la obtención de dicha energía se hace mediante el uso de palas en un arreglo determinado ubicadas en un rotor. Luego se continua con la conversión de energía cinética a energía eléctrica en una turbina ubicada en el cuerpo del aerogenerador [25].

En términos de la capacidad de generar electricidad de este tipo de sistemas, depende de varios factores, especialmente del tamaño de las palas ya que se relaciona con el área de captación del viento, otro factor altamente importante es la velocidad del viento, ya que junto con la densidad de este se determinará las revoluciones por minuto posibles a generar, pero este último también puede verse afectado según el tipo de flujo existente, ya sea laminar o turbulento.

Las instalaciones de este tipo de sistemas pueden ser muy variadas, ya que dependiendo del requerimiento el tamaño del aerogenerador puede variar tremendamente, por un lado las palas pueden alcanzar hasta los 90 metros en instalaciones de parque eólicos y con torres de hasta 100 metros de altura, producto de estas descomunales dimensiones se necesitan grandes terrenos para montar parque eólicos, esto claramente si se habla de uno ubicado en tierra firme, ya que un beneficio de este tipo de sistemas es que se puede instalar en parque eólicos marinos, haciendo uso así de áreas que de otra manera no serían utilizables para la producción de energía.

Pero de igual manera existen instalaciones de menor escala, que puede ser ubicadas en terrenos pequeños con el fin de generar la energía necesaria en la producción agrícola especialmente en lugares alejados donde las condiciones climáticas no son propicias para la generación de electricidad por otros medios renovables.

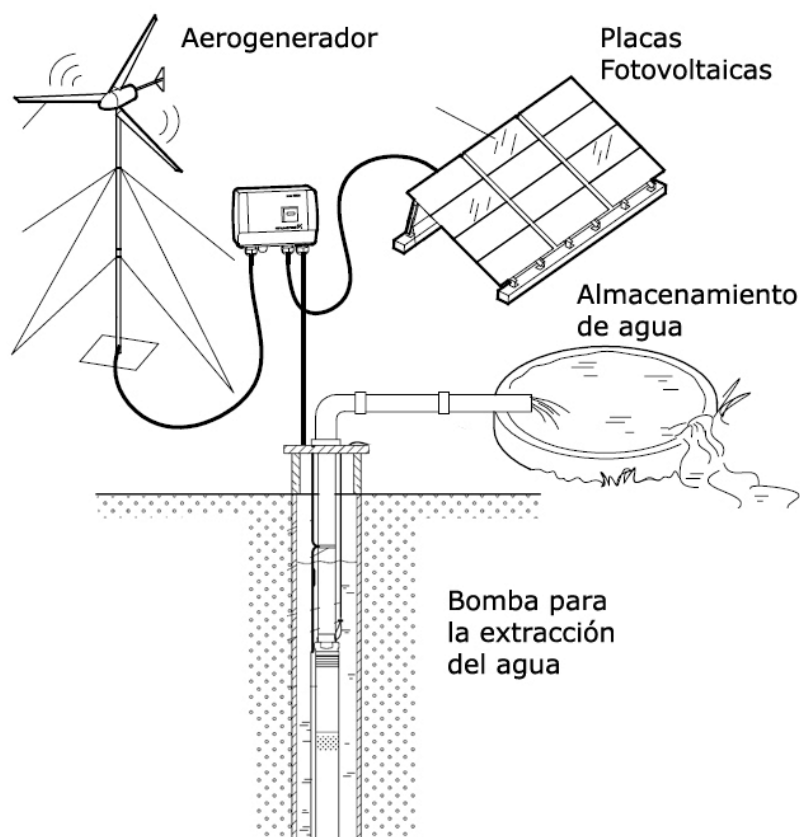


Figura 2-4: Esquema instalación eólica.

Fuente: “planificación y gestión autónoma de los servicios básicos en la zona sur de Cochabamba (Bolivia)”  
[34]

Subsistema de generación de energía: sistema encargado de recoger el viento y transformarlo en energía, esto se hace en primera instancia a través de las palas, las cuales están montadas en un rotor. Como se mencionó hace unos breves párrafos se hace uso de la energía cinética que se puede generar con determinada masa de viento, esto se consigue con el uso de el mismo principio que utilizan los aviones para volar, es decir el principio de sustentación [26], el cual consiste en hacer que una masa de aire fluya sobre una placa de perfil inclinado, una pala en este caso, y dicha masa de aire se divida tal que fluya por ambas caras, y debido a una diferencia de velocidad a recorrer en cada cara se genera una diferencia de presión entre las caras generando así una fuerza resultante que se aplica sobre el perfil (pala).

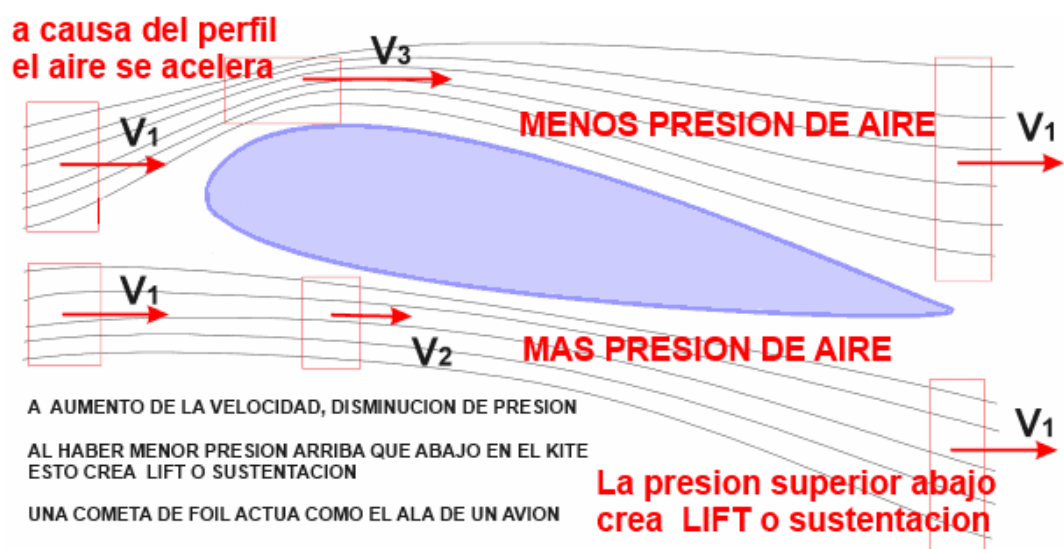


Figura 2-5: funcionamiento efecto sustentación.

Fuente: “por qué vuela una cometa”, ketesurfing club [26]

Subsistema de acondicionamiento: Para hacer mejor aprovechamiento de la energía cinética generada por el rotor, muchos de estos sistemas son equipados con un multiplicador, el cual actúa con el principio contrario a el que posee un reductor como los que conocemos ampliamente en el área mecánica, es decir, el multiplicador consiste en un sistema de transmisión compuesto de una serie de engranajes con el propósito de lograr una mayor velocidad de salida, en otras palabras aumentar las revoluciones por minuto de salida.

Subsistema de conversión de energía: Para generar energía eléctrica este tipo de sistemas debe realizar la conversión de la energía cinética proveniente del viento a energía mecánica que sea susceptible para la conversión a energía eléctrica, y esto en particular se realiza en un generador, haciendo uso de la inducción electromagnética.

Subsistema de frenado: A diferencia de otros sistemas, para la turbina eólica funcionar con vientos con alta velocidad, y por lo tanto con velocidades de rotación mayores a las pensadas en su diseño, pueden afectar de forma grave al mecanismo, por lo que es necesario contar con un sistema de detención en caso de que esto pase a modo de protección.

Subsistema de Control: Para el correcto funcionamiento de todo el sistema hace falta un microprocesador, el que regule tanto la puesta en marcha, funcionamiento y frenado en caso de que se excedan las RPM de funcionamiento.

Como parte de la contextualización de un sistema de generación eléctrica mediante generación eólica, hace falta describir sus ventajas, la primera de estas es el hecho de que opera en base a un principio totalmente diferente a lo visto hasta el momento, y esto se traduce

en que este tipo de sistemas es capaz de funcionar tanto de noche como de día, generando así electricidad sin contaminar el medio ambiente, además entre las formas vistas en este informe la generación eólica posee una eficiencia bastante alta, que llega hasta el 60% en los mejores casos, otro beneficio es su instalación, ya que estos tipos de sistemas son altamente adaptables, ya sea por tamaño y capacidad de generación . Por el otro lado las desventajas de este tipo de sistemas, existe en primer lugar el hecho de la dependencia del viento, el que no necesariamente va a ser suficiente para generar la energía nominal en todo momento. En segundo lugar, debe hacerse un estudio detallado de las condiciones eólica del lugar donde se instalará el sistema, esto debido a que en el caso de que la velocidad del viento sea considerablemente superior al que soporta la turbina se terminarán generando daños a el eje.

## **2.4 GENERADOR A COMBUSTIÓN INTERNA**

A día de hoy una de las soluciones más flexibles a usar para generar electricidad en algún lugar en el cual no hay acceso a esta es la utilización de un generador, dependiendo de la faena a desarrollar y su particular necesidad energética se pueden usar generadores de diferentes tamaños, desde los más simples capaces de otorgar cifras alrededor de 500 Watts que son especialmente útiles para ser transportados a donde sean necesarios, hasta equipos de dimensiones considerablemente más grandes que alcanzan cifras superiores a 50000 Watts, estos últimos usualmente existen para ser utilizados como fuente de alterna de energía en instalaciones empresariales.

De igual manera en labores productivas orientadas a la producción agrícola es común ver que se empleen este tipo de sistemas para proporcionar la energía que puedan necesitar, ya sea en casos de cortes en el suministro eléctrico o por el hecho que no tienen acceso a la red eléctrica. Por lo que es útil para satisfacer las necesidades eléctricas de sistema de riego, como bombas, por ejemplo.

De entre todas las medidas alternas para generar electricidad vistas hasta ahora, esta es la que a día de hoy es más ampliamente usada, si bien no puede ser considerada de funcionamiento estrictamente simple, si es fácil tener acceso a uno de estos sistemas, pues poseen una alta disponibilidad en el mercado y con diferentes potencias nominales.

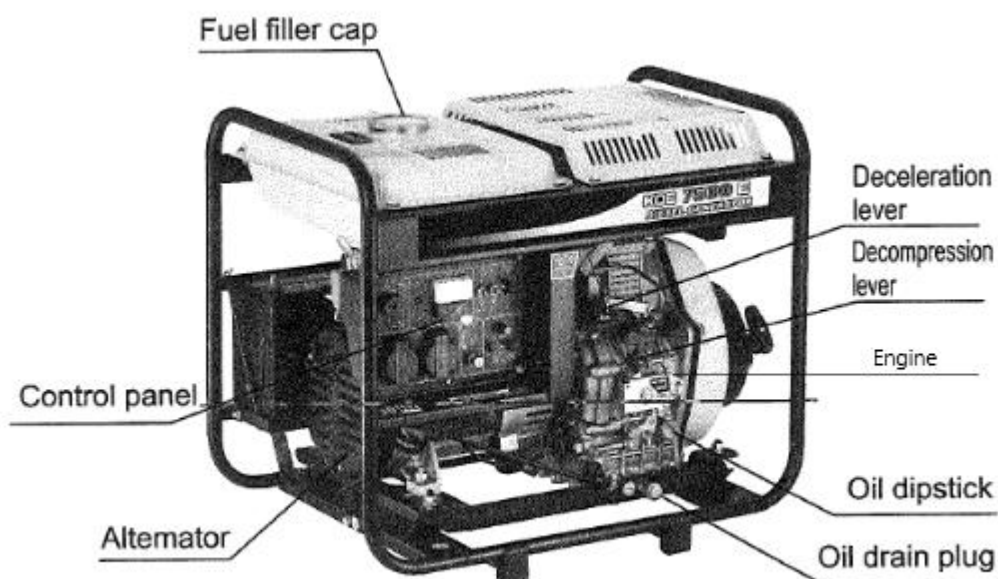


Figura 2-6: partes de un generador.

Fuente: Manual de funcionamiento generadores KIPOR [35]

El funcionamiento también es fundamentalmente diferente de los sistemas mencionados anteriormente, ya que no hace uso de energías renovables provenientes de fuentes como el sol o el viento, sino que hace uso de la ignición de un combustible derivado del petróleo, ya sea gasolina o Diesel con el fin de generar electricidad. Debido a este principio de funcionamiento particular de los motores a combustión interna siempre que se haga uso de uno de estos sistemas se liberará como subproducto dióxido de carbono y también monóxido de carbono en caso de que ocurra una combustión incompleta, en el caso de ser un motor que opera mediante el uso de Diesel, se liberará óxidos de nitrógeno como subproducto.

Subsistema de generación de potencia: Para poder generar energía mecánica, este tipo de sistemas hacen uso de la combustión [27], a modo de resumen en esta se quema un combustible con la finalidad de hacer rotar un eje. Para que la combustión sea posible son necesarios 3 componentes esenciales: oxígeno, combustible y calor. Su funcionamiento parte con la introducción del aire hacia el interior del generador para luego ser comprimido, una vez con la compresión deseada se adiciona el combustible y se proporciona la chispa que generará la combustión, con el impulso de esto se hace bajar un pistón, el cual está conectado a un cigüeñal y es este último el que transmite el movimiento hacia un eje que se conecta a el generador.

Subsistema de generación de electricidad: Como se mencionó anteriormente, este subsistema depende enteramente del motor a combustión interna, el cual transmite el movimiento generado a través de un eje conectándose así un alternador [28], en este último se genera un

campo electromagnético donde el rotor actúa como elemento inductor y el estator (armazón del alternador) actúa como elemento inducido, y de esta interacción se obtiene como resultado corriente alterna.

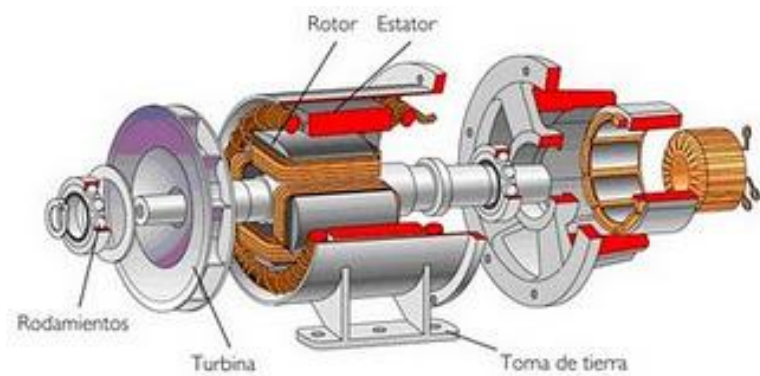


Figura 2-7: Partes de un alternador.

Fuente: “Física II another level”[36]

Como continuación de la metodología desarrollada a lo largo de este capítulo las ventajas que ofrecen los generadores a combustión interna son muchas, en primer lugar, permiten generar una cantidad constante y estable de energía a cualquier hora del día, esto por supuesto depende de la disponibilidad de combustible para realizar su tarea, en segundo lugar una ventaja proviene de ser uno de los medios alternativos de generación de energía más ocupados, y es que existe una muy alta oferta en el mercado para este tipo de sistemas, por lo que tiende a ser fácil conseguir uno acorde a lo requerido en cada caso particular, otra ventaja importante a señalar es que dependiendo de la potencia del generador requerido, existen variantes que son portátiles, permitiendo así mucha más flexibilidad en sus posibles usos. Hablando de desventajas de este tipo de sistemas se encuentra en primer lugar el hecho de que la generación de energía tiene un costo asociado al combustible, por lo que a lo largo de su vida útil del generador no amortiza su costo por ahorros en producción energética, En segundo lugar, está el hecho de que son sistemas mecánicos complejos, por lo que necesitan un mantenimiento constante con tal de asegurar su correcto funcionamiento, en tercer lugar, estos generadores dependen de combustibles fósiles, y esto se traduce en la emanación de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono y monóxido de carbono, e incluso los aún más nocivos óxidos de nitrógeno en el caso de uso de Diesel.

2.5 PILA DE HIDROGENO

Como se ha mencionado en los ejemplos anteriores existe muchas veces el problema de almacenar la energía generada de fuentes renovables, ya que esta es generada a horarios específicos y en cantidades mayormente aleatorias. Muchas veces en instalaciones modernas de este tipo de sistemas se suele utilizar baterías de distintos tipos, usualmente de ion de litio, pero estas tienen costos elevados y se degradan con el tiempo, especialmente en condiciones climáticas más extremas, Dicha problemática influenció que este trabajo fuese enfocado en parte a combatir dicho problema, como se ejemplifica en el primer sistema presentado durante este capítulo, donde se planteó el uso de tecnologías como el pumped storage para funcionar como instalaciones de transición, que permitan simplificar el paso a estas nuevas tecnologías mientras se espera que progrese el desarrollo de alternativas más completas, las cuales propicien un cambio sencillo a medios de generación de energía alternativos.

En busca de una mejor contextualización de las posibilidades para aplicar nuevas tecnologías a entornos agrícolas, es que cobra sentido la utilización de una pila de hidrogeno para la acumulación de energía, pero esto es más bien una mirada al futuro, ya que, si bien a día de hoy esta tecnología está comenzando a masificarse en muchos países pertenecientes al primer mundo, aún le falta una cantidad considerable de desarrollo para reemplazar a las fuentes de energía convencional.

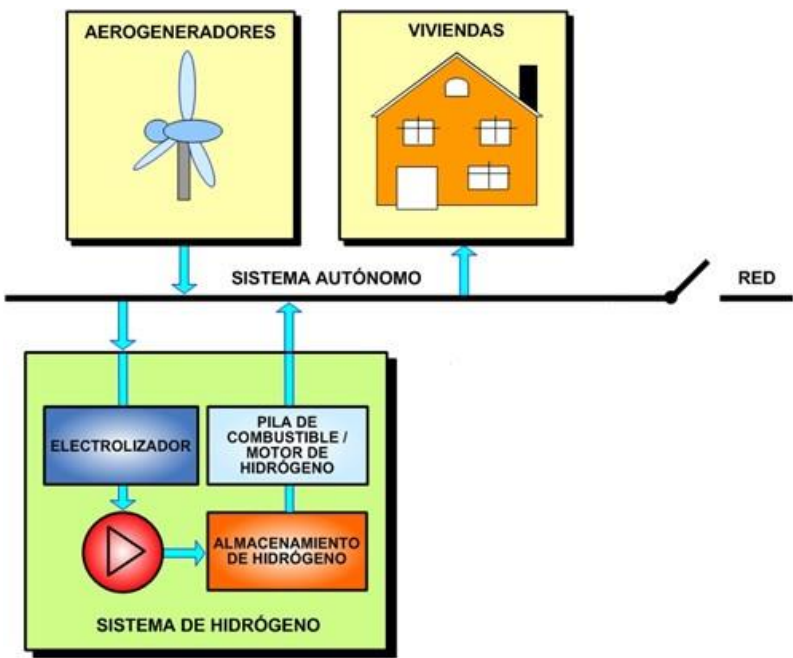


Figura 2-8: Esquema instalación de pila de hidrogeno.

Fuente: “ Aplicación estacionarias de las pilas de combustible”, Universidad del País Vasco[37]

A fecha de escritura de este ensayo existe un marcado impulso de esta tecnología por países primermundistas, tanto de Asia como de Europa, más específicamente Japón y Alemania, donde buscan integrar la pila de hidrogeno a la movilidad del futuro para la generación de electricidad tanto en autos como en trenes y aviones [29]. En el caso de Japón se están centrando fuertemente en establecer una red de distribución de hidrogeno para automóviles impulsados con pilas de hidrogeno, principalmente como alternativa a automóviles a combustión interna en parte de un cambio en las políticas de emisiones de gases contaminantes [30]. Por su parte en Alemania buscan reemplazar los trenes que recorren el país, ya que estos se presentan como una alternativa viable en la reducción de contaminación y no requeriría demasiada inversión en infraestructura, ya que en comparación con sus contrapartes Diesel solo hace falta cambiar la locomotora y el sistema de recarga de combustible (hidrogeno a este caso).

Para la integración de una pila de hidrogeno en un sistema de riego, se basaría en generar electricidad con algún medio renovable como los mencionados en el desarrollo de este capítulo y luego hacer uso de esa electricidad para generar hidrogeno, siempre y cuando exista una fuente considerable de agua. Luego hacer uso del hidrogeno como combustible de la pila para generar electricidad según sea requiera.

Subsistema de generación de hidrogeno: Como primer paso importante en el funcionamiento de este tipo de sistemas esta la generación de hidrogeno a utilizar como “combustible”, este proceso se enmarca en el hecho de utilizar energía para generar un elemento que almacene dicha energía. Para esto se emplea electrolisis [31], que consiste en una reacción que busca separar un elemento o compuesto haciendo uso de una corriente eléctrica. Para funcionar se debe introducir en una cuba electrolítica un electrodo que actúa como ánodo (polo positivo) ,y otro electrodo que actúa como un cátodo (polo negativo), luego se suministra la corriente eléctrica a través del cátodo, obteniendo como resultado Hidrogeno y oxígeno, ambos en estado gaseoso como ilustra la figura 18.

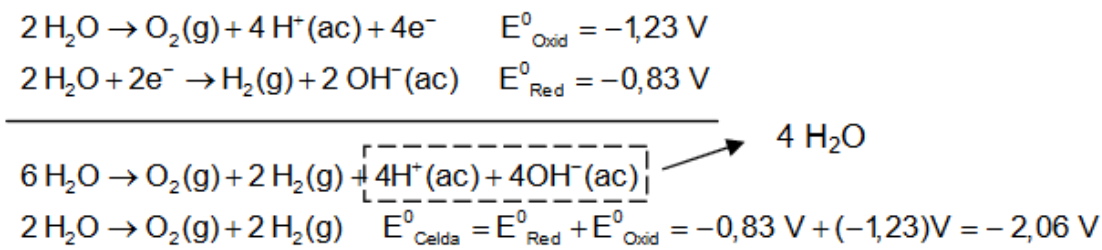


Figura 2-9: Reacción química en la pila de hidrogeno  
Fuente: “Electroquímica III”, IES LA MAGDALENA.[31]

A continuación de este proceso, este hidrogeno resultante debe ser almacenado en un estanque de alta presión, donde esperará a su posterior uso.

Subsistema de generación de electricidad: En términos de la generación de electricidad, lo que se busca es realizar el procedimiento contrario a el realizado anteriormente, es decir, fusionar las moléculas de oxígeno e hidrogeno para obtener energía resultante. Para este proceso se hace uso de una pila de hidrogeno [32], que está compuesta por una serie de celdas, y estas celdas se pueden apilar en la cantidad que se desee para generar la cantidad de electricidad requerida, aportando así un modularidad excepcional al sistema. Cada celda está compuesta en si por una serie de capas, donde en el centro existe una membrana electrolítica, y en ambos costados de esta existe un catalizador de platino que propicia el inicio de las reacciones químicas, y en los extremos de estos hay un ánodo y un cátodo.

La reacción de oxido-reducción que acontece en la celda ocurre de tal manera que ingresa el hidrogeno en estado gaseoso para hacer contacto con el ánodo, donde estimulado por el catalizar de platino el gas se separa en protones de hidrogeno y electrones libres, llegados a este punto se encuentran con la membrana electrolítica en el centro de la celda, y esta permite cruzar a través de ella a los protones de hidrogeno en dirección al cátodo, donde influenciados nuevamente por el catalizador se recombinan con moléculas de oxígeno presentes en el aire.

Mientras los electrones que no son capaces de cruzar la membrana electrolítica son forzados a fluir a través del ánodo en dirección al cátodo por un circuito externo, y en dicho circuito pueden ser dirigidos para lo que sea necesaria dicha electricidad. Al final de todas las reacciones electroquímicas que ocurren en la pila se hidrogeno se obtiene como subproducto agua en forma de vapor, electricidad y un poco de calor.

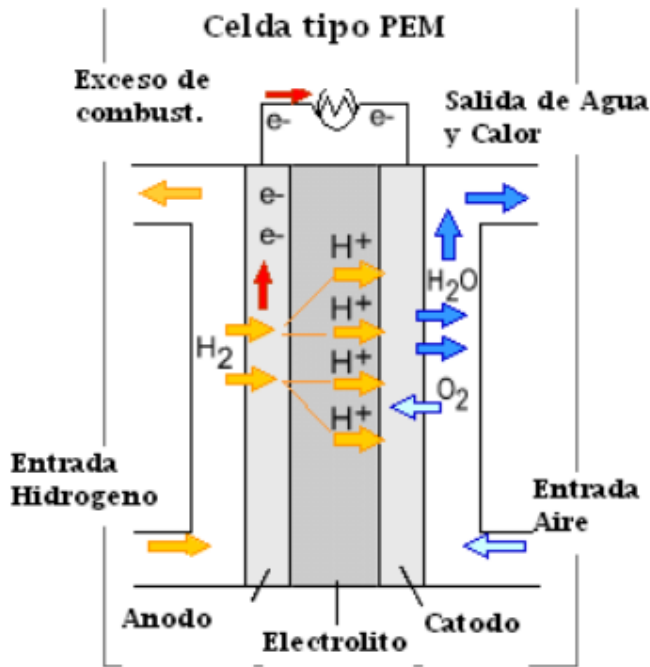


Figura 2-10: Funcionamiento de celda en pila de hidrogeno.

Fuente: “Diseño de una pila de combustible de hidrógeno para producir una diferencia de potencial de 12 voltios.” Universidad Don Bosco.[32]

En términos de ventajas de una posible instalación de pila de hidrogeno, está en primer lugar el hecho de que si la electricidad es proporcionada mediante fuentes renovables no existe ningún tipo de contaminación, ya que se liberaría agua en forma de vapor al medioambiente, en segundo lugar hace falta agregar que permite una generación controlada y flexible de electricidad gracias a poseer un tanque de almacenamiento, donde el hidrogeno es bastante estable y se mantiene en condiciones más seguras que su contraparte combustible fósil, Se puede además aplicar una gran cantidad de circunstancias, ya sea en transporte o usos industriales, aunque esto no es completamente relevante para labores agrícolas . Al hablar de desventajas de este tipo de sistemas surgen cosas como que, a día de hoy es una tecnología todavía le falta desarrollo, si bien muchos países desean empujarla como un estándar son muchas las limitaciones que existen, producto de esto está el hecho que no existe una oferta destacable dentro del país de este tipo de sistemas, e inclusive sus precios todavía siguen siendo bastante altos, una desventaja quizás más importante es la disponibilidad de agua para realizar la electrolisis en el sitio de la operación, si bien esto se puede esquivar transportando el hidrogeno desde otro lugar, esto agregaría más complicaciones al sistema.

2.6 Conclusiones del capítulo.

Tabla 2-1: Matriz de comparación soluciones

| Criterios orientadores | Pumped storage | Riego Fotovoltaico | Generación Eólica | Generador a combustión | Pila de Hidrogeno |
|------------------------|----------------|--------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Desarrollo             | 3              | 3                  | 2                 | 4                      | 1                 |
| Costos operación       | 5              | 4                  | 4                 | 2                      | 1                 |
| Costos de instalación  | 3              | 2                  | 1                 | 5                      | 1                 |
| Facilidad mantención   | 5              | 5                  | 4                 | 3                      | 4                 |
| Facilidad de obtención | 4              | 4                  | 2                 | 5                      | 1                 |
| Fuente renovable       | 5              | 5                  | 5                 | 1                      | 3                 |
|                        | 25             | 23                 | 18                | 20                     | 11                |

Fuente: Elaboración Propia

Para la realización de la matriz de comparación se establecieron puntuaciones desde 0 a 5 en cada categoría mencionada y se puntuó en base a la información recolectada de las fuentes utilizadas a lo largo de este capítulo. En desarrollo se considera cuanto ha avanzado dicha tecnología a lo largo del tiempo, en costos de operación se considera los gastos del tipo de combustible que se utiliza en cada caso, en costos de instalación se tiene en cuenta la magnitud de la instalación y los costos de obtención de cada posible sistema, para facilidad de mantención se considera la frecuencia, dificultad y costos de mantenimiento, en facilidad de obtención se tiene en consideración la disponibilidad de dicho sistema en el mercado nacional y regional, finalmente en el ámbito de innovación se considera que se utilice una fuente renovable para la generación de energía, teniendo especialmente consideración sobre la posible huella de carbono.

En la búsqueda de soluciones que aporten a la eficiencia energética en labores agrícolas, las que usualmente se encuentran alejadas de las grandes urbes, y sufren de problemas en relación con el abastecimiento de electricidad, se dio con la lista presentada durante el desarrollo de este capítulo. Si bien esta lista no detalla todas las posibilidades que existen actualmente en el mercado, si engloba las soluciones que hoy en día parecen más factibles, e inclusive se incluyó la pila de hidrogeno, que cumple el papel de aportar una breve mirada a las capacidades de las tecnologías a día de hoy en desarrollo en materia energética.

En función de contextualizar de mejor manera como se comparan los sistemas mencionados se utilizó la dinámica de mencionar ventajas y desventajas. Dentro de esto, es que si se parte mencionando que se busca la incorporación de nuevas tecnologías que posean un menor impacto en el medio ambiente, los generadores convencionales pierden fuerza como opción.

Esto reduciría la lista de posibles candidatos a los sistemas accionados por energías renovables de la lista anterior, de entre estos, dadas las condiciones climáticas del valle de Quillota, es decir la posible disponibilidad de sol y viento, hace más sentido apuntar hacia la instalación de infraestructura fotovoltaica que se adapta de mejor manera, aunque su contraparte eólica sigue siendo una buena opción en otros posibles casos.

En términos de energía fotovoltaica, está uno de sus mayores contraargumentos, es decir, el almacenamiento de la energía generada, si bien lo más común hoy en día es la utilización de baterías, estas tienen un costo considerable y además se degradan con el pasar del tiempo. Por otro lado, la utilización de pilas de hidrógeno es una opción que a futuro plantea ser una solución muy versátil, pero por desgracia a día de hoy le falta bastante desarrollo, tanto en la infraestructura necesaria para expandir esta tecnología, como también la reducción de costos de equipo y en la posible oferta en el mercado nacional.

De esta forma, el pumped storage con generación fotovoltaica, se posiciona como una opción con real validez, que podría llegar a solucionar los posibles problemas existentes hoy en día en materia energética, y llevar a cabo un papel como tecnología de transición a los grandes avances que se espera, lleguen en los próximos años y generen una verdadera revolución energética.

## Capítulo 3: Desarrollo de solución

### 3.1 CIFRAS A CONSIDERAR

Entre las cifras más importantes a tener en cuenta para el planteamiento de este tipo de instalación, está el requerimiento de agua que existe para las determinadas condiciones de la plantación.

Como primer paso para determinar cuánta agua necesita un cultivo [54] hace falta determinar la evapotranspiración de este, esto se refiere a la suma de tanto el agua que se evapora desde la superficie de la tierra después de riego o lluvia, como a la que se evapora desde la planta misma. Para obtener la evapotranspiración hace falta llevar a cabo un ensayo estandarizado, donde en una tina plástica se llena con una cantidad predefinida de agua y se mide la pérdida por evaporación. A esto además se le agregan valores de corrección para hacer que tenga más sentido con relación a una plantación real.

Debido a que la zona elegida para el planteamiento de este ensayo no es más que de referencia, se han de obtener estos valores de una estación de monitoreo meteorológica de la zona [38]. En los valores mostrados a fecha de realización de este ensayo existía un valor promedio de evapotranspiración potencial (Eto) de 5.75 [mm/día]. Primero ese valor debe pasar por una corrección para pasar a ser evapotranspiración del cultivo (Etc).

$$Etc = Eto \times Kc \times Kr$$

Donde:

Kc: corresponde al coef. de cultivo.

Kr: Factor de corrección debido al porcentaje de área sombreada.

En este caso en particular para el Kc se usa un valor de 0.72, pues este valor se mantiene constante durante todo el año según lo señalado por INIA [39]. Y con respecto al factor de corrección, corresponde a alrededor del 70% de sombra debido a que son paltos adultos, dando así un valor de Kr de 1.

$$Etc = 5.75 \times 0.72 \times 1$$

$$Etc = 4.14 \left[ \frac{mm}{día} \right]$$

El siguiente calculo necesario para obtener los requerimientos de agua, corresponde a las demandas brutas del cultivo (Db). Esto relaciona la cantidad real de agua necesaria con las posibles pérdidas de eficiencia que surgen según el tipo de riego que se utilice. Esto corresponde a la eficiencia de aplicación (Efa), y en el caso del riego por goteo se debe aplicar un factor de 0.9 .

$$Db = Etc/Efa$$

$$Db = 4.14/0.9$$

$$Db = 4.6 \left[ \frac{mm}{día} \right]$$

Con los requerimientos brutos del cultivo ya calculados se puede extrapolar esta información a valores más cómodos para entender las necesidades hídricas reales, para eso hace falta calcular los requerimientos de agua por planta (Rap).

$$Rap = Db \times mp$$

Donde:

Mp: Marco de plantación, este indica la separación que existe entre las plantas cultivadas. En este caso se encuentran en un arreglo 5 x 3.

$$Rap = 4.6 \times 5 \times 3$$

$$Rap = 69 \left[ \frac{\text{litros}}{\text{planta}} \right]$$

Si bien, esta cifra está en línea con valores que otros autores plantean para el consumo de agua en el área de Quillota, hace falta considerar que los datos usados de evapotranspiración corresponden a meses de invierno y primavera, por lo que, para considerar el posible consumo de agua en las condiciones más desventajosas, se usará el doble del valor considerado de evapotranspiración, obteniendo, así como resultado un Rap de 138 [Litros/Planta/día].

### 3.1.1 FRECUENCIA DE RIEGO

Al hablar de riego, se debe hablar en términos de varios factores relacionados, como por ejemplo el tiempo de riego, caudal de el mismo y la frecuencia de riego, esta última hace referencia al tiempo que existe entre riegos, ya que, dependiendo del cultivo y las características del suelo para retener agua, se puede obtener mejores resultados en términos productivos si se prefiere distanciar el riego.

El riego usualmente se clasifica como de alta o baja frecuencia. Siendo el de alta frecuencia aquel riego que se suele realizar todos los días, producto de esto la cantidad de agua utilizada tiene que ser apenas la suficiente para mantener la humedad necesaria en las raíces. Por el

otro lado el riego de baja frecuencia se distancia en varios días, por lo que la cantidad de agua utilizada es considerablemente mayor, ya que la humedad en las raíces de durar durante un mayor número de días.

**3.1.2 RIEGO DE BAJA FRECUENCIA**

Como paso previo a la determinación de la frecuencia de riego es necesario precisar la cantidad de agua que un tipo de suelo puede retener, para lo que se debe calcular el agua disponible (AD). Es importante destacar que usualmente en un terreno extenso es altamente probable que la capacidad de retención de agua del suelo varíe considerablemente de un área a otra, por lo que análisis más detallados del suelo se hacen necesarios, pero como eso escapa de los alcances de este ensayo se usarán valores representativos.

$$AD = [(CC\%-PMP\%)/100 \times DA] \times H \times UR \times PSM \times (1-Pied)$$

Donde: AD: Agua disponible.

CC%: Capacidad de campo del suelo

PMP%: Porcentaje de marchites permanente

DA: Densidad aparente del suelo

H: Profundidad de raíces

UR: umbral de riego

PSM: Porcentaje de suelo mojado por los emisores

Pied: Fracciones de piedras por el perfil de suelo

De estas variables mencionadas, una gran parte son reguladas según el tipo de suelo en el cual existe la plantación como se demuestra a continuación en la tabla 2. Sobre las variables restantes, la profundidad de raíces de un palto adulto es de alrededor de 60 [cm] según señala un estudio realizado por PROVALTT [40]. El umbral de riego es un criterio de riego que determina cuando se acaba la humedad aprovechable del suelo, 0,35 en promedio. El porcentaje de suelo mojado por los emisores depende del tipo de cultivo que se trabaje, en este caso corresponde a el 50% (0.5). La fracción de piedras por el perfil de suelo depende enteramente del tipo de suelo de la plantación, pero un valor promedio es del 30% (0.3).

Tabla 3-1: Características de suelo según textura predominante

| Textura             | Porosidad<br>Total<br>(%) | Densidad<br>Aparente<br>(Da) (g/cc) | Capacidad<br>de campo<br>CC | Punto de<br>Marchites<br>Permanente<br>PMP | HA<br>(Peso seco ) | HA<br>(Volumen ) | CR<br>(mm de<br>agua/mm<br>suelo) |
|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|--------------------|------------------|-----------------------------------|
| Arenoso             | 38<br>(32 – 42)           | 1.65<br>(1.55– 1.80)                | 9<br>(6 – 12)               | 4<br>(2 – 6)                               | 5<br>(4 – 6)       | 8<br>(6 – 10)    | 0,08<br>(0,06 – 0,10)             |
| Franco<br>Arenoso   | 43<br>(40 – 47)           | 1.50<br>(1.40– 1.60)                | 14<br>(10 – 18)             | 6<br>(4 – 8)                               | 8<br>(6 – 10)      | 12<br>(9 – 15)   | 0,12<br>(0,09 – 0,15)             |
| Franco              | 47<br>(43 – 49)           | 1.40<br>(1.35– 1.50)                | 22<br>(18 – 26)             | 10<br>(8 – 12)                             | 12<br>(10– 14)     | 17<br>(14– 20)   | 0,17<br>(0,14– 0,20)              |
| Franco<br>Arcilloso | 49<br>(47 – 51)           | 1.35<br>(1.30– 1.40)                | 27<br>(23– 31)              | 13<br>(11– 15)                             | 14<br>(12– 16)     | 19<br>(16– 22)   | 0,19<br>(0,16– 0,22)              |
| Arcillo<br>Arenoso  | 51<br>(49 – 53)           | 1.30<br>(1.25– 1.35)                | 31<br>(27– 35)              | 15<br>(14– 16)                             | 16<br>(13– 17)     | 21<br>(18– 23)   | 0,21<br>(0,18– 0,23)              |
| Arcilloso           | 53<br>(51 – 55)           | 1.25<br>(1.20– 1.30)                | 35<br>(31 – 39)             | 17<br>(15 – 19)                            | 18<br>(16 – 20)    | 23<br>(20 – 25)  | 0,23<br>(0,20 – 0,25)             |

Nota: los intervalos normales son consignados entre paréntesis: HA, Humedad aprovechable, CR, capacidad de retención de agua del suelo

Fuente: “Manual de riego para paltos y cítricos” [39]

según detalla la DGA [57], el suelo predominante en la rivera del rio Aconcagua, donde se ubica esta plantación de paltos, es predominantemente del tipo arcilloso, por lo que en relación a la tabla 2 se hará uso de los valores promedios acorde a este tipo de suelo.

$$AD = \left[ \frac{CC\% - PMP\%}{100} \times DA \right] \times H \times UR \times PSM \times (1 - PIED)$$

$$AD = 16.53 \text{ [mm]}$$

De esta manera el agua que las plantas son capaces de extraer del suelo antes de ser necesario volver a regar es de 16.53 [mm], con este valor se puede proceder a calcular el tiempo en el cual cada planta agotará el agua disponible y sea necesario volver a regar. Para este cálculo se usará tanto el valor recién obtenido de agua disponible y el valor de evapotranspiración usado anteriormente, y como se mencionó este será del doble a él usado en calculo, ya que se busca emular una situación veraniega, donde las exigencias son mayores, por lo que la Etc será de 8.28 [mm/día]. Con esto el cálculo de frecuencia de riego se evalúa según lo siguiente.

$$Fr \text{ [días]} = \frac{AD[mm]}{Etc \left[ \frac{mm}{día} \right]}$$

$$Fr \text{ [días]} = \frac{16.53}{8.28}$$

$$Fr = 1.99[días] \text{ , Aproximadamente cada 2 días se debe regar.}$$

### 3.2.3 CAUDAL Y TIEMPO DE RIEGO EN BAJA FRECUENCIA

Con los datos anteriores ya se tiene cada cuanto tiempo se debe regar, pero con el fin cumplir con la cantidad de humedad requerida por los paltos durante dicho tiempo se debe conocer el tiempo por el cual se debe regar a un caudal determinado. Para determinar ese caudal se debe tener en cuenta el emisor a utilizar, dicho emisor corresponde a el dispositivo encargado de entregar el agua a la planta, para paltos se suele usar tanto emisores por goteo, como micro aspersores, donde entre ellos se diferencian por el caudal máximo del que disponen.

$$Q_{pl} = q \times Ne \times (Cu\%/100)$$

Donde:

$Q_{pl}$ : Caudal de agua aplicado a cada planta [L/hr]

$q$ : caudal del emisor

$Ne$ : Numero de emisores por planta

$Cu\%$ : Coeficiente de uniformidad de los emisores

El caudal del emisor ( $q$ ) depende particularmente del emisor utilizado, para este ejemplo se usarán emisores con un caudal máximo de 8 (L/hr) y 4 emisores por planta. El coeficiente de uniformidad se obtiene en base a un estudio de las condiciones de operación, pero un valor representativo para estas condiciones seria de 87% ( $Cu$ ). Una vez calculado el caudal se debe proceder a obtener la intensidad de precipitación del equipo ( $I_{pp}$ ), valor que relaciona el caudal y la disposición de la plantación, y permite conocer el tiempo de riego.

$$Q_{pl} = 8 \times 4 \times (87/100)$$

$$Q_{pl} = 27.84 \left[ \frac{L}{hr} \right]$$

Para la intensidad de precipitación se usa en este caso un marco de plantación ( $M_p$ ) de 5 x 3

$$I_{pp} = Q_{pl}/M_p$$

$$I_{pp} = 27.84/(5 \times 3)$$

$$I_{pp} = 1.85$$

Finalmente, para conocer el tiempo de riego se debe considerar la intensidad de precipitación del equipo (Ipp), el agua disponible (AD) y la eficiencia del emisor utilizado (Efa), en este caso corresponde a un 90 % (0.9).

$$Tr = \left(\frac{AD}{Efa}\right)/Ipp$$

$$Tr = \left(\frac{16.53}{0.9}\right)/1.85$$

$$Tr = 9.92 , \text{ aproximadamente 10 horas de riego.}$$

### 3.1.4 RIEGO DE ALTA FRECUENCIA

El riego de alta frecuencia tiene un carácter más bien de riego diario, donde simplemente se busca satisfacer la demanda bruta de agua que existe en una plantación, por lo que disminuyen considerablemente los tiempos de riego en comparación con el riego de baja frecuencia.

Como primer paso es necesario obtener el caudal (Qpl) que se aplica a cada planta individualmente, dicho procedimiento fue realizado anteriormente en el punto anterior por lo que no se entrará en mayor detalle. Luego solo hace falta determinar el tiempo de riego, esto se hace relacionando el caudal (Qpl) y el requerimiento de agua por planta (Rap) como se indica a continuación.

$$Tr \left[ \frac{hr}{día} \right] = \frac{Rap}{Qpl}$$

$$Tr = \frac{69}{27.84}$$

$$Tr = 2.48 \left[ \frac{hr}{día} \right] , \text{ aproximadamente 2 horas y 30 minutos.}$$

Este resultado demuestra lo mencionado anteriormente, es decir que, si bien el caudal por planta requerido se mantiene, varía considerablemente la cantidad de horas de riego, permitiendo así una mayor flexibilidad en términos de riego fotovoltaico, ya que es posible hacer uso de las horas de mayor irradiación solar disponible. Otro factor que destacar es que en el riego de alta frecuencia no se debe tener en consideración la capacidad del suelo para mantener la humedad, ya que en condiciones más bien normales el riego se puede distanciar considerablemente, a modo de ejemplo de esta el estrés hídrico controlado que se aplica en algunas plantaciones, en las cuales este estrés es capaz de generar incrementos considerables en la producción si es aplicado correctamente.

Por lo que de ahora en adelante se tomará en cuenta como parámetro de riego el Riego de alta frecuencia, pues como se mencionó tiene características que favorecen el uso de energías fotovoltaicas para riego.

Como parámetro clave con relación al dimensionamiento del sistema, está la altura manométrica total para la instalación, para este caso se considerará como profundidad del pozo promedio de 15 [m], por lo que la bomba deberá estar a cerca de 13 [m] de profundidad. Además, a esto se debe sumar las pérdidas de carga que se producen en la instalación, y que según datos de INGEMECANICA [61] se ubican cerca de 16 [m], dando así un total de 29[m] de altura manométrica como requerimiento en esta ocasión.

Tabla 3-2: Resumen general de parámetros de riego

| Resumen parámetros de riego |          |           |
|-----------------------------|----------|-----------|
| parámetro                   | Cantidad | Unidad    |
| área plantada               | 8        | [Ha]      |
| Arboles por Ha              | 416      | [Arboles] |
| Marco plantación            | 5x3      | [m²]      |
| Arboles totales             | 3328     | [Arboles] |
| Efa                         | 90%      | /         |

|                                     |       |          |
|-------------------------------------|-------|----------|
| Etc                                 | 8,28  | [mm/día] |
| Numero de emisores                  | 4     | /        |
| Frecuencia en riego baja frecuencia | 2     | [días]   |
| Q. por planta                       | 27.84 | [L/hr]   |
| Q. Total en la plantación           | 1540  | [L/min]  |
| Altura manométrica Total            | 29    | [m]      |
| Tiempo de riego en alta frecuencia  | 2.5   | [hr]     |

Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos desarrollados en este trabajo

*Cabe destacar que muchos de los valores presentes en esta tabla hacen referencia a condiciones más bien anómalas, no representativas de lo que se puede esperar durante el desarrollo de un año normal, pero con el fin de demostrar una condición desventajosa en el verano, particularmente en el mes de enero fue que se obtuvieron dichos valores.*

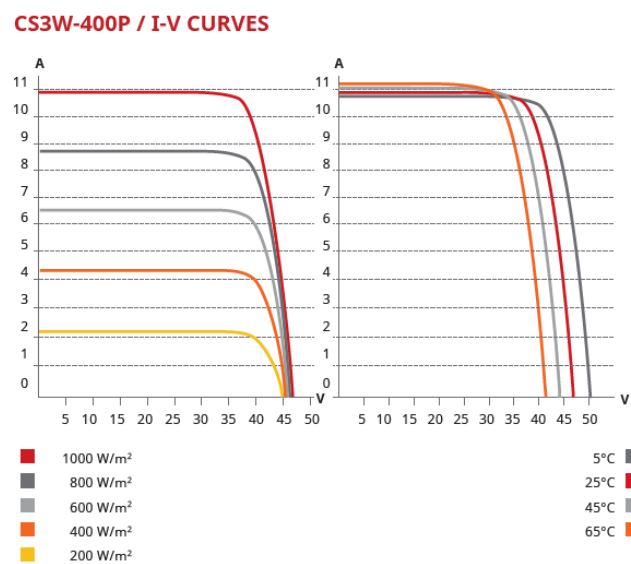
### 3.2 COMPONENTES RIEGO FOTOVOLTAICO

Como parte importante del funcionamiento del sistema desarrollado a lo largo de este ensayo, hace falta determinar los componentes que satisfacen los parámetros calculados. A este punto el componente que es realmente necesario de determinar es el panel fotovoltaico utilizar en el sistema.

Pero primero, es necesario dejar estipulado que los parámetros de calculo que se usarán para continuar con la determinación de los componentes del riego fotovoltaico serán los mismo mencionados anteriormente en la realización de este capítulo.

Eso significa que el caudal a utilizar será 1540 [L/min] (90m³ /h) y la altura de descarga será de 29 [m].

Tabla 3-3: Curvas de operación del panel fotovoltaico



Fuente: Catalogo Canadian Solar [41]

En relación con el panel fotovoltaico seleccionado, es de la marca HiKu, específicamente el modelo CS3W- 410P. Este panel destaca por ser un panel policristalino, que ofrece un buen rendimiento, además tiene una potencia máxima nominal de 313 [Watt] y una eficiencia de 19%. Junto a panel hace falta un regulador de carga que proteja el sistema, recomendable uno que trabaje sobre un 25% de la corriente de cortocircuito del panel. además, se recomienda la instalación de un variador de frecuencia para regular el trabajo de la bomba, ya que genera un gran beneficio en términos de la reducción del consumo eléctrico. Dicho variador de frecuencia debe ser acorde a los requerimientos de la bomba, teniendo en cuenta la potencia y la corriente máxima de la misma.

3.3 CONSUMO ELÉCTRICO DE LA BOMBA SELECCIONADA

Como parte del proceso para determinar la cantidad de paneles a utilizar es necesario primero conocer los consumos energéticos en las condiciones de trabajo dadas. Por lo que se tomará en cuenta las condiciones de trabajo descritas anteriormente, un caudal de 1540 [L/min] y una altura de 29 [m], además según se especifica en el catálogo a esta curva de rendimiento esta bomba otorga en torno a un 80% de eficiencia[η].

$$Ceh[kWh] = \frac{Qx H}{367x \eta}$$

Donde:

Ceh: Consumo energético horario

Q: Caudal de trabajo[m<sup>3</sup>/hr]

H: altura de impulsión [m]

η: Eficiencia de la bomba

$$Ceh[kW] = \frac{90 \times 29}{367 \times 0.8}$$

$$Ceh[kW] = 8.6$$

Con el consumo energético horario determinado (Ceh), ahora es posible determinar el consumo energético estimado diario (Ced), el cual es necesario para conocer la cantidad de paneles fotovoltaicos a usar en la instalación. Se calcula multiplicando el Ceh por el tiempo de riego (Tr)

$$Ced[kWh] = Ceh \times Tr$$

$$Ced[kWh] = 8.8 \times 2.5$$

$$Ced[kWh] = 22.2$$

Se puede decir entonces, que durante el tiempo total de operación por día el consumo energético de la bomba es de alrededor de 22200 [Watts].

### 3.4 SELECCIÓN DE CANTIDAD DE PANELES

Al seleccionar la cantidad de paneles fotovoltaicos a utilizar, hay que tener en cuenta los distintos factores que podrían afectar el rendimiento de dichos paneles. En primer lugar, para el posicionamiento de los paneles se debe considerar tanto el ángulo de azimut como el ángulo de inclinación, el azimut se refiere a la dirección en la que “apunta” el panel, esto se dimensiona según los grados de inclinación con respecto al norte magnético. Y el ángulo de inclinación hace referencia a como el panel recibe la radiación proveniente del sol.

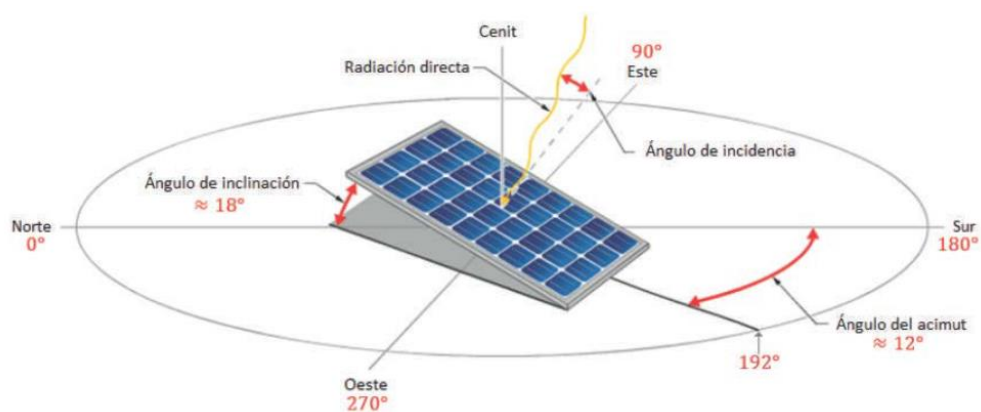


Figura 3-1: Ejemplo de ángulo de azimut e inclinación del panel  
Fuente: Manual sobre instalaciones de plantas fotovoltaicas [42]

Para este caso en particular se recomienda para un buen aprovechamiento de la radiación solar, un azimut de 180° y un ángulo de inclinación de 30° como menciona Pedro Lillo en su memoria [43].

Además, hace falta tener en consideración una gran cantidad de factores propios de la ubicación elegida que pueden generar pérdidas, y tienen directa relación con como determinar la cantidad de paneles a utilizar como describe la siguiente formula.

$$N_{mod} = \frac{Ced}{P_{mp} \times HSP_{crit} \times Pr}$$

Donde:

Nmod: número de módulos

Ced: Consumo energético diario estimado

Pmp: Potencia pico del módulo fotovoltaico

HSP crit: valor de las horas de sol pico del mes

Pr: Performance Ratio, es decir la eficiencia del sistema en condiciones reales

El consumo energético diario se calculó previamente en el punto anterior, la potencia pico del módulo fotovoltaico seleccionado es de 313[Watt], el valor de HSP crit se obtiene de mediciones de radiación realizadas por centros meteorológicos, en este caso para el mes más crítico, es decir enero, hay un promedio de 7.92 [kWh/M²/Día] según datos del explorador solar del ministerio de energía [44]. Finalmente, el performance ratio es un porcentaje que engloba las posibles pérdidas individuales que pueden ocurrir como se demuestra a continuación.

Tabla 3-4: Resumen perdidas en paneles fotovoltaicos

|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| Perdidas por dispersión de potencia de los módulos                  | 3%   |
| Perdidas por incremento de temperatura de las células fotovoltaicas | 7%   |
| Perdidas debido a acumulación de suciedad                           | 3%   |
| Perdidas por sombras                                                | 2%   |
| Perdidas por degradación de los módulos                             | 1%   |
| Perdidas eléctricas                                                 | 1.5% |
| Perdidas por reflectancia                                           | 2.9% |
| Pr= 100%-3%-7%-3%-2%-1.5%-2.9% = 79.6%                              |      |

Fuente: Elaboración propia en base a datos de INGEMECANICA [54]

Ya una vez con todos los datos obtenidos se puede calcular la cantidad de paneles necesarios.

$$N_{mod} = \frac{22200}{313 \times 7.92 \times 0.796}$$
$$N_{mod} = 11.6$$

Por lo tanto, para las condiciones anteriormente mencionadas serían necesarios 8.1 módulos, pero como hace falta redondear al entero mayor posible para que tenga sentido lógico se necesitarían un total de 12 paneles.

3.5 TURBINA EN PUMPED STORAGE

Cuando se habla de pumped storage, por lo general, lo primero en surgir como ejemplo de este tipo de sistemas es una central hidroeléctrica altamente compleja, diseñada para abastecer de electricidad a una gran cantidad de personas, y es que gran parte de la idea para realizar este trabajo de título fue un interés en las grandes posibilidades que estas instalaciones están ofreciendo en materia energética.

De la forma más común en que se presentan estas instalaciones es como una central hidroeléctrica de bombeo [50], la cual a grandes rasgos es muy similar a una central hidroeléctrica tradicional, pero que se compone de dos embalses, entre los cuales existe una diferencia de altura considerable. La idea de este tipo de implementación es que la central funciona de tal manera que durante las horas “Valle”, es decir las de menor consumo, se usa energía restante de otras centrales eléctricas para bombear agua desde el embalse inferior al superior, y así se aprovecha el menor coste de mercado de esa energía. Y en las horas de mayor requerimiento energético, es decir las horas “Pico”, la central funciona de manera convencional, enviando el agua acumulada en el embalse superior hacia el inferior y generando energía a base de la cinética que adquiere el agua en la caída.

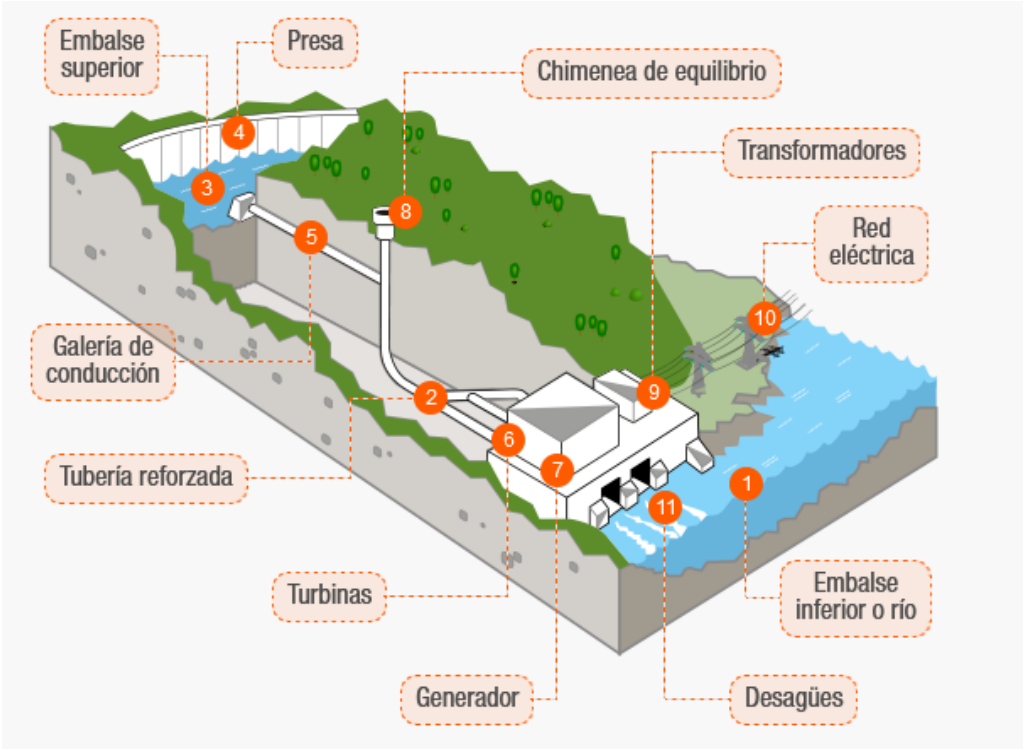


Figura 3-2 :Esquema central hidroeléctrica de bombeo

Fuente: “¿sabes para que sirven las centrales hidroeléctricas de bombeo?” [50]

Por lo general las instalaciones hidroeléctricas de bombeo se clasifican en 2 grupos según su funcionamiento, el primer grupo lo conforman las instalaciones de bombas y turbinas, en las que las bombas y las turbinas funcionan de manera independiente según la tarea que se realiza en ese momento, el según grupo lo conforman las instalaciones con turbinas reversibles, y como su nombre implica se hace uso de una turbina que cumple ambas funciones según sea necesario.

Además, normalmente en este tipo de instalaciones se suelen usar turbinas de 3 tipos principales: la turbina Pelton, la turbina Kaplan y la turbina Francis. Siendo esta ultima la más utilizada ya que su funcionamiento es posible con una gran variedad de saltos y caudales.

La turbina Pelton es una turbina muy característica por su funcionamiento, ya que los alabes de esta turbina poseen forma de dos medias cucharas [45], a las cuales golpea el agua a alta presión proveniente de un inyector, y como resultado de esta interacción que poseen los alabes y el agua a presión, donde esta última se desvía casi totalmente, transfiriendo así una gran parte de la energía cinética hacia el rodete, que finalmente será el encargado de producir energía eléctrica.

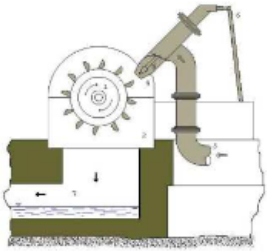
|        |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                      |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Pelton | <ul style="list-style-type: none"><li>• Saltos de gran altura (&gt; 200 m) y caudales pequeños (inferiores a 10 m³/s)</li><li>• Buen rendimiento para amplios márgenes de caudal (30-100 %)</li><li>• Regulación del caudal mediante inyectores de distribuidor</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Ejemplo de turbina Pelton (central de Artés)<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Velocidad giro: 600 r/m</li><li>▪ Caudal máximo: 5 m3/s</li><li>▪ Salto útil: 756 m</li><li>▪ Potencia en el eje: 35,88 MW</li></ul></li></ul> |  |
|        |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                      |

Figura 3-3: explicación características turbina Pelton

Fuente: Estudio numérico de los fenómenos transitorios aplicados a una central hidráulica de bombeo puro [60]

La turbina Kaplan posee una forma también bastante característica [46] , ya que sus alabes tienen una figura similar a una hélice, lo que permite el impacto optimo en cualquier Angulo de los alabes, maximizando así la transferencia de energía. Además, producto de esa forma se da un comportamiento característico de las turbinas de sobrepresión, donde la presión del agua disminuye constantemente durante todo su recorrido a través del rodete.

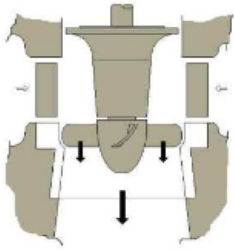
|        |                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                       |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Kaplan | <ul style="list-style-type: none"><li>• Saltos de pequeña altura (&lt;50m) y caudales medios y grandes (&gt;15m3/s)</li><li>• Alto rendimiento para amplio margen caudal (30-100 %)</li><li>• Doble regulación caudal (distribuidor y palas rotor orientables)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Ejemplo de turbina Kaplan (central de Ribarroja)<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Velocidad giro: 125 r/m</li><li>▪ Caudal máximo: 225 m3/s</li><li>▪ Salto útil: 32 m</li><li>▪ Potencia en el eje: 67,7 MW</li></ul></li></ul> |  |
|        |                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                       |

Figura 3-4: explicación características turbina Kaplan

Fuente: Estudio numérico de los fenómenos transitorios aplicados a una central hidráulica de bombeo puro [60]

La turbina Francis hace uso de la diferencia de presión existente entre la entrada y la salida del impulsor para generar el movimiento del rodete [47]. Se caracteriza por hacer que el agua fluya hacia un distribuidor móvil, el cual se puede abrir o cerrar según se requiera, para así regular el flujo hacia el rodete que posee alabes fijos.

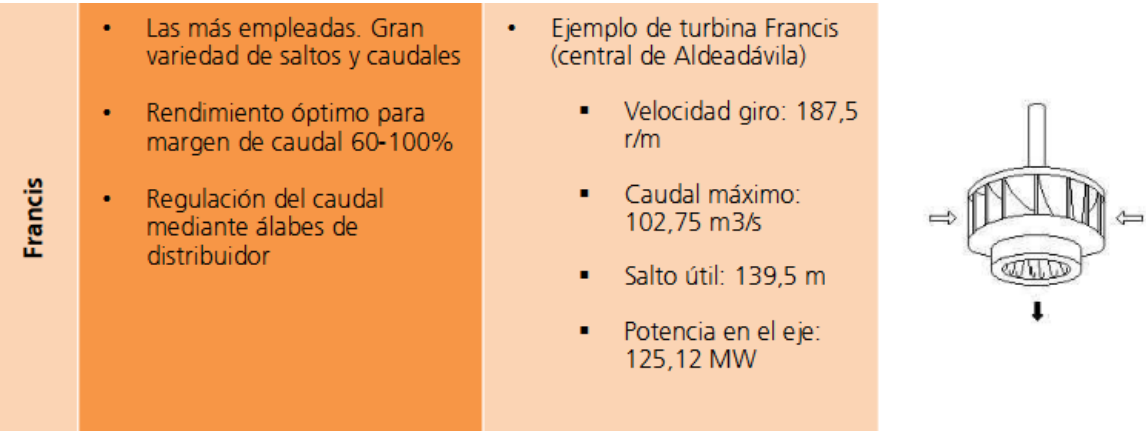


Figura 3-5: explicación características turbina Francis

Fuente: Estudio numérico de los fenómenos transitorios aplicados a una central hidráulica de bombeo puro [60]

3.6 PROBLEMÁTICA DE LA SELECCIÓN DE TURBINA

Como se describió anteriormente, estas turbinas son altamente conocidas y usadas en el mercado energético mundial, lo que implica que existen una cantidad considerable de estudios enfocados a sus curvas de operación y parámetros asociados. Por lo cual es fácil cometer el error de intentar hacer uso de este tipo de turbinas para aplicaciones de menor escala, como la tratada a lo largo de este ensayo.

Lamentablemente dicho esfuerzo resulta infructuoso, ya que al hacer el ejercicio de buscar algún fabricante que ofrezca estas turbinas, los resultados más comunes solo hacen referencia a aplicaciones industriales como las vistas antes, especialmente la industria energética. Lo que se traduce en modelos disponibles que exceden por mucho las dimensiones necesarias para el proyecto.

Y al hacer una búsqueda con un enfoque distinto, en el que se buscan soluciones de menor tamaño, suelen aparecer diseños más bien experimentales, de los que no hay datos concretos, ni curvas de rendimiento asociadas, y tampoco formas reales de adquirir dichos diseños.

Producto de esto, la solución más lógica restante es explorar el uso de una bomba centrífuga para ser usada como turbina reversible [48]. Y es esto último lo que más resultados coherentes arroja, pues las bombas centrífugas llevan entre nosotros por muchos años, por lo que su funcionamiento es bastante conocido y existe una gran variedad de análisis de curvas de rendimiento.

Si se analiza su diseño, surge a la vista el hecho de el funcionamiento de una bomba centrífuga no difiere mayormente de el de una turbina hidráulica, simplemente realizan el proceso inverso una de otra. En términos de transferencia de energía, la bomba centrífuga transfiere la energía desde el impulsor hacia el fluido, por el contrario, la turbina hidráulica transforma la energía proveniente del fluido y la transfiere al rodete donde se dirige esa energía mecánica hacia un alternador.

Estas diferencias de funcionamiento también se traducen a las curvas de funcionamiento, ya que si bien las curvas de las bombas centrífugas están bien estudiadas y son predecibles en gran medida, el comportamiento de la bomba trabajando como turbina puede variar considerablemente dependiendo de la forma en la que impacta el agua con los alabes.

Los beneficios que ofrece esta solución son variados, ya que las bombas centrífugas poseen una gran disponibilidad en el mercado, lo que las hace más baratas y accesibles, también es más simple encontrar una que se acomode a las necesidades individuales de cada caso. Además, poseen una mayor disponibilidad de repuestos y de mano de obra especializada para labores de mantenimiento.

También las desventajas son variadas [51], ya que en gran parte el desconocimiento de las curvas de operación suele significar que es bastante difícil encontrar el punto de operación más eficiente, otro punto bastante importante a destacar es el hecho que al no estar diseñadas para trabajar con el sentido contrario es muy probable que se genere soltura de componentes, especialmente de tuercas y rodamientos.

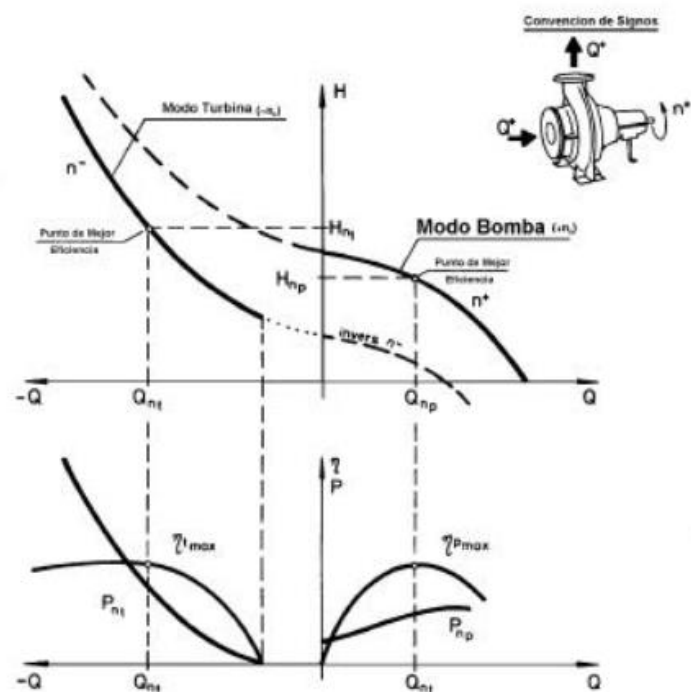


Figura 3-6: Ejemplo curvas de operación modo bomba y modo turbina  
Fuente: Bombas utilizadas como Turbinas [51]

### 3.7 BOMBA CENTRIFUGA A SELECCIONAR

Como primer paso de esta selección hace falta tener en cuenta el hecho de que para obtener los mejores resultados hace falta un análisis más en detalle del funcionamiento de la bomba como turbina, es decir, poder obtener acceso a las curvas de rendimiento y eficiencia, para lo cual sería ideal poder emplear un banco de pruebas que simule las posibles condiciones de operación. Ya que la gran mayoría de fabricante no proporciona dichos datos, aunque existen casos particulares como el fabricante alemán KSB [58], el cual proporciona datos estimativos del rendimiento de sus bombas en el formato PAT (Pump as turbine), pero lamentablemente las condiciones de trabajo medidas por dicho fabricante son demasiado altas en comparación con las requeridas en esta ocasión.

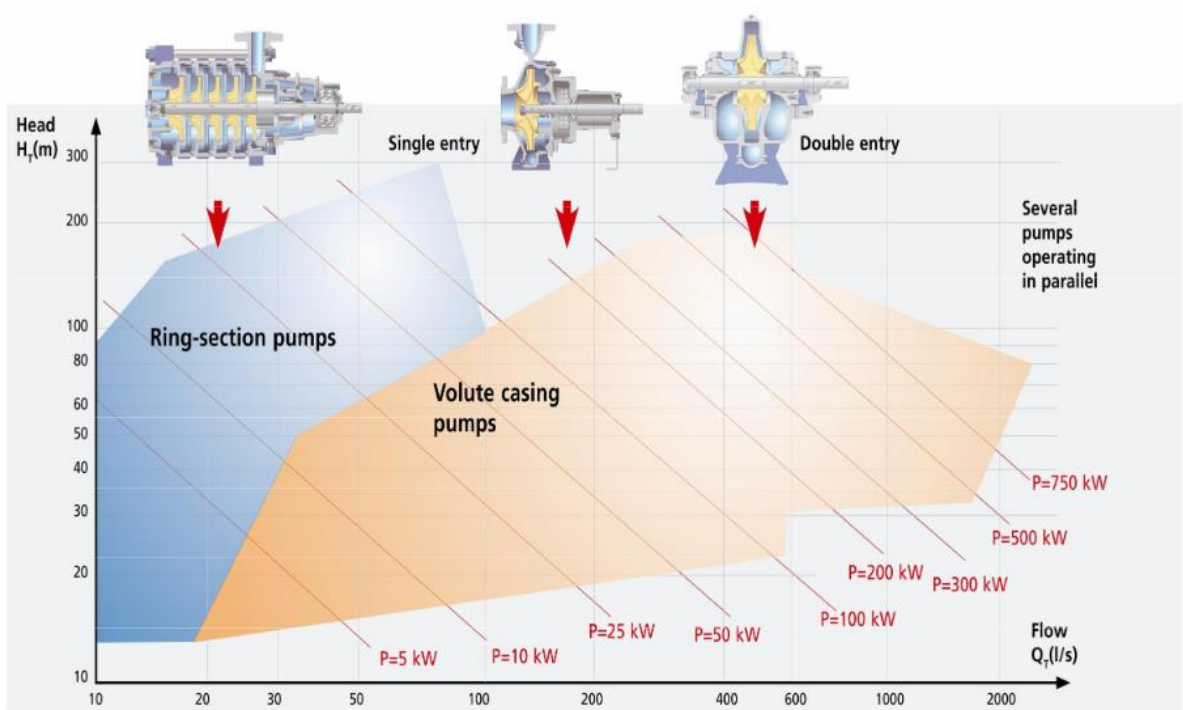


Figura 3-7: Estimación rendimiento PAT

Fuente: Application-oriented planning documents for Pumps as Turbines [58]

Por lo tanto, como solución alternativa, se procederá a realizar el cálculo de energía generada por turbinas en condiciones de operación, pero hace falta destacar que esto no es más que una aproximación del posible rendimiento a obtener.

$$Pe = \eta_{el} \times \eta_t \times H_t \times Q_t \times g \times \rho$$

Donde:

$\eta_{el}$ : eficiencia eléctrica

$\eta_t$ : eficiencia hidráulica

$H_t$ : altura total

$Q_t$ : caudal total

$g$ : aceleración de gravedad

$\rho$ : densidad del agua

Para este caso, la eficiencia eléctrica ( $\eta_{el}$ ) se considerará del 96%, la eficiencia hidráulica ( $\eta_t$ ) del 75%, la altura total ( $H_t$ ) será de 150 [m], el caudal será de 10 [m³/h], la aceleración de gravedad 9.8 [m/s²] y la densidad del agua de 1000[Kg/ m³]. lo que daría como resultado:

$$Pe = 0.96 \times 0.75 \times 15 \times \left( \frac{150}{3600} \right) \times 9.8 \times 1000$$

$$Pe = 4410 [Watt]$$

$$Pe \approx 4.41 [KW]$$

Lo ideal a considerar, seria buscar una bomba centrífuga para usar como turbina hidráulica que posea una eficiencia hidráulica del 75% como la usada para el cálculo anterior. Según estudios hechos a otras bombas el caudal para trabajar como turbina suele ser más del doble del de bomba.

Por lo que si la bomba se turbina se alimenta con varios estanques es capaz de generar cerca de un 25% de la energía total del sistema, o un porcentaje mayor de energía si se busca regar un área menor. Lo que se traduce en la posibilidad de ahorrar en la cantidad de paneles a utilizar o bien ayudar a operar en caso de que el suministro de los paneles no es el adecuado.

### 3.8 DETALLES DE LA INSTALACIÓN

Como se mencionó en el punto anterior, se estima que se haga uso de varios estanques, 5 en total, que posean una capacidad de almacenar un aproximado de 30 m³, para lo cual se recomienda que este hecho de algún acero inoxidable, como alguno aleado con níquel y cromo, o quizás como medida de ahorro de costos este hecho de algún plástico, como los de

polietileno lineal de alta densidad ofrecidos por un gran abanico de empresas en la región [52].

En relación con la torre, esta debe tener una altura igual o superior a los 15 [m], un ejemplo de una torre de este tipo es la construida por la empresa Patagonia ingeniería [53] para la ciudad de Chonchi en Chiloé en la Región de Los Lagos.

Para el riego se recomienda hacer uso de una bomba sumergible, ya que se obtienen mejores rendimientos para este tipo de instalaciones, esta debe tener un caudal de 90 [m<sup>3</sup>/h] y una elevación de 29 [m]. Para la bomba centrífuga a usar, se debe tener en cuenta que debe ser capaz de bombear un caudal cercano a 60 [m<sup>3</sup>/h], ya que será acorde al tiempo disponible para bombear agua hacia los estanques, pues operará las horas restantes de sol en las cuales no se realice el riego.

### **3.9.1 RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO**

Parte importante del enfoque que se busca con este ensayo es el hecho de dimensionar el mantenimiento que se debe realizar a un pumped storage con generación fotovoltaica. La mejor manera de realizar dicho dimensionamiento es hablando individualmente de los componentes presentes en el sistema.

En primer lugar, los paneles fotovoltaicos, estos se caracterizan por no poseer elementos móviles, por lo que en general no poseen un desgaste remarcable, de hecho, su vida útil es bastante larga, por lo bajo cerca de 25 años, y si se mantiene de forma adecuada puede llegar sobre 35 años [59].

Su mantenimiento en general es bastante simple, mayormente consiste en mantener limpia la superficie del panel, ya que la acumulación de polvo se traduce directamente en pérdidas de rendimiento que en casos más graves pueden superar el 30 % de reducción de rendimiento. Se recomienda realizar estas limpiezas cerca de 4 veces al año dependiendo de las condiciones climáticas a las cuales están expuestos los paneles. Es importante tener en consideración que al hacer dicha limpieza hay que tener especial cuidado de no rayar en exceso la superficie de vidrio de los paneles, ya que podría afectar la capacidad de las células fotovoltaicas en los paneles de absorber la radiación de forma eficiente. En general se suele utilizar cerca de 20 litros de agua por panel.

Además, si bien normalmente los paneles están contruidos a partir de materiales inoxidables al igual que las estructuras de montaje, pero, de igual manera en algunos casos es posible que

se forme corrosión, por lo que es importante cuando se realizan las labores de limpieza revisar el estado de dichos paneles y las estructuras que los soportan.

Lo último a tener en consideración con relación a el mantenimiento de los paneles fotovoltaicos es tener especial cuidado con el posible crecimiento de arbustos cerca de los paneles que puedan llegar a bloquear la luz del sol.

Sobre el mantenimiento de la bomba sumergible, lo principal a tener en cuenta es hacer un chequeo constante de los parámetros de funcionamiento, es decir, estar atento a posibles indicadores de que algo está funcionando mal en el sistema [55], como, por ejemplo: disminución de presión o de caudal que pueda deberse a una acumulación de sedimento en el interior de la bomba; También se debe estar atento a ruido excesivo proveniente del motor o sobre calentamientos, lo que podría indicar fallos del mismo; También es muy importante monitorizar el estado del pozo, ya que una disminución excesiva del nivel del agua podría afectar de forma considerable al rendimiento de la bomba.

Se recomienda hacer una mantención de carácter preventiva una vez al año, en la cual se debe revisar el motor, los cojinetes y las válvulas principales del sistema, se debe buscar posibles signos de que sedimentos entraran al cuerpo de la bomba, además se deben buscar signos de corrosión en los componentes y posteriormente hacer reemplazo de dichos componentes afectados. Al ensamblar se debe limpiar todas las piezas y lubricar.

Sobre el mantenimiento a la bomba trabajando como turbina, se debe monitorizar con bastante frecuencia el estado de esta, ya que producto de que se usa de una manera que no fue diseñada, se recomienda revisar constantemente en busca de posibles vibraciones producto de soltura mecánica en la bomba, ya que es común que se suelten las tuercas de anclaje.

Se recomienda revisar mensualmente el nivel de aceite en los depósitos de los cojinetes, además se debe revisar que no existan signos de fugas visibles en los sellos mecánicos [56]. Es recomendable revisar de forma semestral que las condiciones de operación se mantengan según lo estipulado en el diseño.

### **3.9.2 RECOMENDACIONES DE INSTALACIÓN**

Para la instalación de los paneles solares, en primer lugar, el terreno seleccionado debe ser amplio y estar libre de posibles árboles y arbustos que puedan llegar a generar sombra sobre los paneles. Durante la instalación es importante medir de forma correcta el Angulo de azimut y la inclinación de los paneles calculado previamente, ya que son factores importantes del

rendimiento del sistema. Finalmente, los componentes eléctricos como por ejemplo el regulador de carga deben ser ubicados en lugares secos y alejados de la lluvia.

Sobre la instalación de bombas sumergibles es necesario fijar claro el hecho de que estas bombas no se deben hacer partir fuera del agua, ya que podría dañar la bomba. Es recomendable hacer las conexiones eléctricas primero, y una vez terminado hay que verificar que todas las conexiones queden selladas apropiadamente, también es recomendable hacer las conexiones de tuberías fuera del pozo, ya que esto hará el trabajo más fácil, y de igual manera hace falta revisar que todo quede sellado apropiadamente para que no se generen problemas más tarde durante el funcionamiento de la bomba. Para la instalación es recomendable agregar un filtro entre el fondo del pozo y la bomba sumergible, pero entre ambos debe existir una separación de cerca de 1 metro. Finalmente, no se debe olvidar dejar un cable conectado a la bomba para posterior recuperación en labores de mantenimiento o reemplazo.

Finalmente, sobre la instalación de la bomba centrífuga trabajando como turbina hidráulica, se debe considerar previamente el hecho de que la bomba estará funcionando de forma anormal, por lo que es importante que esté montada firmemente y que las tuercas tengan algún tipo de líquido fijador, ya que es común que se suelten. Otra consideración importante es verificar que no existe ningún tipo de desbalanceo importante que pudiese producir un exceso de vibración, ni que exista un desalineamiento entre la bomba y el alternador.

## Conclusiones y propuestas de mejora

A lo largo de este trabajo de título se describió una problemática concreta en relación a la disponibilidad energética en una zona agrícola, pero también se buscó caracterizar como esos problemas se reflejan a nivel país, y como así la búsqueda de soluciones innovadoras pueden no solo disminuir costos y mejorar la confiabilidad de la producción, sino que algunos casos hasta agregar valor a los productos que se importan. Además, mediante la inclusión del riego tecnificado se logran generar ahorros en uso de agua.

Para el caso de estudio, se planteó el pumped storage, que tenía cualidades que lo hacían destacar sobre el resto, ya que su uso en grandes instalaciones fotovoltaicas e hidroeléctricas había sido probado a cabalidad, pero al intentar adaptarlo para el uso a menor escala surgieron problemas imprevistos.

El problema más notable de todo el sistema es la disponibilidad de turbinas comerciales con caudales y potencias acorde a las menores necesidades del uso planteado en el trabajo de título. En la posible solución de esto, el uso de bombas como turbinas, surge otro problema, y es el desconocimiento de las curvas de funcionamiento de dichas bombas operando como turbinas. Todo esto dio como resultado una producción de energía eléctrica menor que, si bien podría hacer más sentido en una plantación de menor escala, no es del todo correcta para este caso de estudio.

Con tal de mejorar esta idea, en primer lugar, ser capaz de usar un banco de pruebas que permita determinar de antemano el rendimiento de la turbina, para así diseñar acorde a eso. En segundo lugar, sería mejor integrar este sistema en plantaciones de menor tamaño, donde tenga más sentido la instalación.

O bien hacer uso de este tipo de sistemas en plantaciones que cerca tengan alguna formación geológica permita la construcción de un sistema pumped storage a una escala adecuada para la plantación que se busca satisfacer.

## Bibliografía

- [1] Gonzales, Daniela, “Evolución de la población de Chile y tasas de crecimiento intercensal 1907-2002”. [En línea] < <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-74935.html> > [Consulta: mayo 2020]
- [2] “Instituto nacional de estadísticas” [En línea] < <https://www.ine.cl/> > [Consulta: mayo 2020]
- [3] Harrison, Paul, “Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030” [En línea] Food and agriculture organization of the united states, 1970 <<http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s00.htm#TopOfPage>> [Consulta: Mayo 2020]
- [4] Carbonell, Claudia, “Agricultura Chilena reflexiones y desafíos al año 2030”[En línea] <[https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf\\_2030-1.pdf](https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf)> [Consulta: Mayo 2020]
- [5] “Invertir en el clima, invertir en el crecimiento una síntesis” [En línea]<<http://www.oecd.org/env/cc/g20-climate/una-sintesis-investing-in-climate-investing-in-growth.pdf>> [Consulta: Mayo 2020]
- [6] Bonilla, Carlos, “Causas, consecuencias y mitigación de sequías en Chile” [En línea] 1999 <<http://revistacienciapolitica.uc.cl/index.php/REDAE/article/view/11010/10118> > [Consulta: Mayo 2020]
- [7] “Geoenciclopedia” [En línea] < <https://www.geoenciclopedia.com/el-nino-y-la-nina/> > [Consulta: Mayo 2020]
- [8] “Proyecto de código de aguas” [En línea] Santiago de Chile <<https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=documentos/10221.1/27594/1/204257.pdf> > [Consulta: Mayo 2020]
- [9] Campillo Raúl, “ La sequía subterránea y silenciosa” [En línea] <[https://www.researchgate.net/publication/322962833\\_Sequia\\_Invisible](https://www.researchgate.net/publication/322962833_Sequia_Invisible) > [Consulta: Junio 2020]
- [10] “Dirección general de aguas” [En línea] < <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx> > [Consulta: Junio 2020]
- [11] “Ficha técnico-económica palto en plano región de Valparaíso” [En línea] <<https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2014/08/fichaPaltoValpo.pdf> > [Consulta: Junio 2020]

- [12] “Paltas, producción y mercado” [En línea] < <https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/6paltas-produccionmercado.pdf?sfvrsn=0> > [Consulta: Junio 2020]
- [13] “Determinación de la disponibilidad de aguas subterráneas en el valle del río Aconcagua” [En línea] ministerio de obras públicas dirección general de aguas, Santiago, 2015 < <https://snia.mop.gob.cl/sad/SUB-5593.pdf> > [Consulta: Junio 2020]
- [14] “Energía región” [En línea] < <https://energiaregion.cl/region/VALPO> > [Consulta: Junio 2020]
- [15] Collantes, Fernando, “La industrialización de la agricultura” [En línea] < [https://economia\\_aplicada.unizar.es/sites/economia\\_aplicada.unizar.es/files/archivos/55/la\\_industrializacion\\_de\\_la\\_agricultura\\_-\\_texto.pdf](https://economia_aplicada.unizar.es/sites/economia_aplicada.unizar.es/files/archivos/55/la_industrializacion_de_la_agricultura_-_texto.pdf) > [Consulta: Junio 2020]
- [16] “El estado mundial de la agricultura y la alimentación-1955” [En línea] < <http://www.fao.org/3/a-ap643s.pdf> > [Consulta: Junio 2020]
- [17] “La industria del salitrero en Chile (1880-1930)” [En línea] < <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-3309.html#presentacion> > [Consulta: Julio 2020]
- [18] “Mega sequía actualidad territorial” [En línea] < [https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial/mega\\_sequia](https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial/mega_sequia) > [Consulta: Julio 2020]
- [19] “Componentes de instalación solar fotovoltaica” [En línea] < <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf> > [Consulta: Julio 2020]
- [20] “La célula solar” [En línea] < [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_04.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm) > [Consulta: Julio 2020]
- [21] Romero, Jacobo, “Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador. Caso de estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró” [En línea] < <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/26396/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y> > [Consulta: Julio 2020]
- [22] Abella, A. Chenlo, F. y Blanco, J. “Optimización del uso de convertidores de frecuencia con bombas centrífugas y motores trifásicos en sistemas de bombeo fotovoltaico” [En línea] < [https://www.academia.edu/27844462/Optimizaci%C3%B3n\\_Del\\_Uso\\_De\\_Convertidores\\_De\\_Frecuencia\\_Con\\_Bombas\\_Centr%C3%ADfugas\\_y\\_Motores\\_Trif%C3%A1sicos\\_en\\_Sistemas\\_De\\_Bombeo\\_Fotovoltaico](https://www.academia.edu/27844462/Optimizaci%C3%B3n_Del_Uso_De_Convertidores_De_Frecuencia_Con_Bombas_Centr%C3%ADfugas_y_Motores_Trif%C3%A1sicos_en_Sistemas_De_Bombeo_Fotovoltaico) > [Consulta: Julio 2020]

- [23] “Riego fotovoltaico para una agricultura más sostenible” [En línea] < <https://www.chileenergias.cl/2020/03/03/riego-fotovoltaico-una-agricultura-mas-sostenible/> >[Consulta: Julio 2020]
- [24] Velasco, Jorge, “Cosecha de energía fotovoltaica para uso en riego” [En línea] < <https://www.redagricola.com/cl/cosecha-energia-fotovoltaica-uso-riego/> >[Consulta: Julio 2020]
- [25] Moragues, Jaime, Rapallini, Alfredo, “Energía eólica”, Instituto Argentino de la energía “General Mosconi” [Consulta: Julio 2020]
- [26] “Porque vuela una cometa” [En línea] < <http://www.edmcpollensa.com/es/por-que-vuela-una-cometa/> > [Consulta: Agosto 2020]
- [27] “Como funciona un generador Diesel” [En línea] < <https://grupel.eu/es/grupel-es/como-funciona-generator-diesel/> > [Consulta: Agosto 2020]
- [28] “¿Qué es un generador eléctrico?” [En línea] < <http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/que-es-un-generator-electrico> > [Consulta: Agosto 2020]
- [29] “Alemania: trenes de hidrogeno completan con éxito su periodo de prueba” [En línea] El desconcierto, 10 de agosto de 2020 < <https://www.eldesconcierto.cl/2020/08/10/alemania-trenes-de-hidrogeno-completan-con-exito-su-periodo-de-prueba/> > [Consulta: Agosto 2020]
- [30] Pastor, Javier. “Mientras el mundo piensa en un futuro de coches electricos, Japón lo apuesta (casi) todo al coche de hidrógeno” [En línea] Xataka, 2020 <<https://www.xataka.com/vehiculos/mundo-piensa-futuro-coches-electricos-japon- apuesta-casi-todo-al-coche-hidrogeno-1> > [Consulta: Agosto 2020]
- [31] “Electroquímica III Electrolisis” [En línea] Asturias < <https://fisquiweb.es/Apuntes/Apuntes2Qui/Electroquimica3.pdf> > [Consulta: Agosto 2020]
- [32] Doñan, Oscar y Sermeño, Salvador “Diseño de una pila de combustible de hidrógeno para producir una diferencia de potencial de 12 voltios” [En línea] El salvador < [http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/11715/213/1/44375\\_tesis.pdf](http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/11715/213/1/44375_tesis.pdf) > [Consulta: Agosto 2020]
- [33] “Bombeo y riego solar fotovoltaico” [En línea] < <https://www.newensolar.cl/proyectos-bombeo-y-riego-solar-fotovoltaico/> > [Consulta: Agosto 2020]
- [34] Lara, Angela, “Planificación y gestión autónoma de los servicios básicos en la zona sur de Cochabamba (Bolivia)” [En línea] < [https://www.researchgate.net/publication/264492713\\_PLANIFICACION\\_Y\\_GESTION\\_A](https://www.researchgate.net/publication/264492713_PLANIFICACION_Y_GESTION_A)

UTONOMA DE LOS SERVICIOS BASICOS EN LA ZONA SUR DE COCHABA  
MBA BOLIVIA > [Consulta: Agosto 2020]

[35] “Manual de funcionamiento” [En línea] < [https://movaenergy.fr/uploads/productos\\_kipor/id36/MANUAL\\_KDE7000\\_ESP-FR-PT.pdf](https://movaenergy.fr/uploads/productos_kipor/id36/MANUAL_KDE7000_ESP-FR-PT.pdf) > [Consulta: Agosto 2020]

[36] “Generador, alternador, transformador y otras aplicación del electromagnetismo” [En línea] < <http://fisica2anotherlevel.blogspot.com/2011/11/generador-alternador-transformador-y.html> > [Consulta: Agosto 2020]

[37] San Martín José, Zamora Inmaculada, Aperribay Víctor, Buigues Garikoitz “Aplicaciones estacionarias de las pilas de combustible” [En línea] departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad del País Vasco < [http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/pilas\\_2/pilas\\_2.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/pilas_2/pilas_2.html) > [Consulta: Agosto 2020]

[38] “Evapotranspiración potencial, Quillota” [En línea] < <http://www.agroclima.cl/InformesAgroclima/InformesAgroclimaticos.aspx?IdEst=114&Info=23> > [Consulta: Agosto 2020]

[39] Gil, Pilar, Sellés Gabriel, Ferreyra Raúl “Manual de riego para paltos y cítricos” [En línea] < <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/apartado/NR40374.pdf> > [Consulta: Agosto 2020]

[40] Gil, Pilar, “El cultivo del palto” [En línea] < [http://www.avocadosource.com/papers/Chile\\_Papers\\_A-Z/G-H-I/GilPilar2004.pdf](http://www.avocadosource.com/papers/Chile_Papers_A-Z/G-H-I/GilPilar2004.pdf) > [Consulta: Agosto 2020]

[41] “Catálogo Canadian Solar” [En línea] < [https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian\\_Solar-Datasheet-HiDM\\_CS1U-MS\\_EN.pdf](https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiDM_CS1U-MS_EN.pdf) > [Consulta: Agosto 2020]

[42] “Manual sobre instalaciones de plantas fotovoltaicas” [En línea] < [http://ayllusolar.cl/wp-content/uploads/2018/05/manual\\_instalaciones\\_fotovoltaicas.pdf](http://ayllusolar.cl/wp-content/uploads/2018/05/manual_instalaciones_fotovoltaicas.pdf) > [Consulta: Agosto 2020]

[43] Lillo, Pedro. “Manual para el dimensionamiento y evaluación de un arreglo fotovoltaico monofásico a nivel residencial en Chile” [En línea] < <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23347/3560900257150UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y> > [Consulta: Agosto 2020]

[44] “Explorador Solar” [En línea] < <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/> >

[45] “Turbina Peltons WWS” [En línea] < <https://www.wws-wasserkraft.at/es/productos/turbina-pelton> > [Consulta: Agosto 2020]

- [46] “ WWS Kaplan Turbine” [En línea] < <https://www.wws-wasserkraft.at/es/productos/turbina-kaplan> > [Consulta: Agosto 2020]
- [47] “Turbinas Francis” [En línea] < <http://www.ghiggia.it/es/productos/turbinas-francis> > [Consulta: Agosto 2020]
- [48] Mella, Pablo “implementación de banco de pruebas para ensayos mono y trifásico de grupo Bomba-Turbina” [En línea] < <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/25806/3560900231937UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y> > [Consulta: Agosto 2020]
- [49] “Utilización de Bombas centrífugas como turbinas hidráulicas” [En línea] < <https://www.ideassonline.org/tecnologias/E020.Utilizaci%C3%B3n%20de%20bombas%20centr%C3%ADfugas%20como%20turbina%20s%20hidr%C3%A1ulicas.Chile.pdf> > [Consulta: Agosto 2020]
- [50] “¿Sabes para qué sirven las centrales hidroeléctricas de bombeo?” [En línea] < <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/central-hidroelectrica-bombeo> > [Consulta: Agosto 2020]
- [51] Audisio, Orlando “ Bombas utilizadas como turbinas” [En línea] < <https://carlosmartinezc.files.wordpress.com/2012/01/bombcomo-turb.pdf> > [Consulta: Agosto 2020]
- [52] “Tanques de polietileno para agua potable” [En línea] < <https://www.emilianaserbatoi.com/public/file/acquaspa-13529.pdf> > [Consulta: Agosto 2020]
- [53] “Construcción sistema agua potable rural de Tarahuin, Chonchi” [En línea] < <https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=e3PgAA5sLgDwnyFlygiSCw==> > [Consulta: Agosto 2020]
- [54] “Instalación solar fotovoltaica para el bombeo de agua para riego” [En línea] < <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn193.html> > [Consulta: Agosto 2020]
- [55] “Consejos para el mantenimiento de una bomba sumergible” [En línea] < <https://www.aiguapres.es/consejos-mantenimiento-bomba-sumergible/> > [Consulta: Agosto 2020]
- [56] “Check list para el mantenimiento preventivo de bombas centrifugas” [En línea] < <https://tecnologiaparalaindustria.com/check-list-para-el-mantenimiento-preventivo-de-bombas-centrifugas-2/> > [Consulta: Agosto 2020]

[57] “Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad” [En línea] < <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Aconcagua.pdf> > [Consulta: Agosto 2020]

[58] “Application-oriented planning documents for pumps as turbines” [En línea] < <https://www.ksb.com/blob/52858/13564c16a6b15b3c28b1d544ae52d0e4/pat-en-data.pdf> > [Consulta: Agosto 2020]

[59] “Cuál es la vida útil de los paneles solares” [En línea] < <https://euskenergy.com/cual-es-la-vida-util-de-los-paneles-solares/> > [Consulta: Agosto 2020]

[60] haya, Fernando “Estudio numérico de los fenómenos transitorios aplicados a una central hidráulica de bombeo puro” [En línea] < <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5120/direccion/Memoria%252F> > [Consulta: Agosto 2020]

[61] “Calculo de una instalación de riego por goteo” [En línea] < <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn207.html> > [Consulta: Agosto 2020]