



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PARQUE FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN DEPÓSITOS DE RELAVE EN LA ZONA CENTRO-NORTE DE CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

VÍCTOR JESÚS ARROYO SÁEZ

PROFESOR GUÍA:

SEBASTIÁN BARRIOS JULLIAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ROBERTO CORVALÁN PAIVA

RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico  
**POR:** Víctor Jesús Arroyo Sáez  
**FECHA:** 21/11/2017  
**PROFESOR GUIA:** Sebastián Barrios Jullian

## **Estudio de prefactibilidad de la implementación de un parque fotovoltaico flotante en depósitos de relave en la zona centro-norte de Chile.**

El norte de Chile es el lugar con mayor radiación a nivel global, por lo que existe una gran disponibilidad para desarrollar proyecto de energía fotovoltaica, por otro lado, es de suma importancia el cuidado y el uso eficiente del agua en la minería, por esto se realiza el estudio con un objetivo principal que es evaluar técnica y económicamente la implementación de la tecnología fotovoltaica flotante en depósitos de relaves mineros, con aplicación en la zona centro y norte del país.

Esto se realiza mediante la recopilación de información en línea y bibliográfica, primero con un estudio de mercado que indica que existen 52 depósitos disponibles en Chile para la aplicación, decidiéndose además continuar con los depósitos de relave, Ovejería, El Mauro y Laguna Seca. Segundo obteniendo la capacidad energética e hídrica a través de sitios web de Chile, que entregan datos de las estaciones meteorológicas cercanas a los tres depósitos escogidos. En particular se usa la aplicación del ministerio de energía llamada explorador solar para el cálculo de la energía generada.

A partir de la recopilación de información de las plantas fotovoltaicas flotantes existentes en el mundo, se decide realizar un diseño de acuerdo a lo que se ha hecho, conjunto a ello se decide utilizar paneles ya probados en esta área, es por eso que se escogen los paneles Yingli y Ja solar para la realización del estudio. Por el contrario, el panel Film es descartado por posibles problemas a la hora de la mantención.

En el diseño de la planta se escoge como material de diseño tuberías de PVC por el costo de ellas y se realiza un diseño parecido a las plantas flotantes vistas, componiéndose básicamente de dos tuberías que soportan los paneles y dos tuberías que sirven de pasillo. Por otra parte, se escoge un sistema de seguimiento ya probado el cual consiste en un bloque de paneles que gira en torno al centro de la estructura, este se diseña con tuberías siguiendo la misma forma que el sistema escogido.

El proyecto bajo cualquier caso analizado, es rentable para el depósito de Laguna Seca con paneles sin inclinación, el caso base con financiamiento entrega que para cualquier configuración se tiene un VAN positivo en el depósito de Laguna Seca, con una TIR de 20,6% para paneles sin inclinación y de 16,8% para paneles con seguimiento, 11,4% para paneles con inclinación y por último una TIR de 8,1% para la planta de El Mauro sin inclinación.

El proyecto es técnicamente factible instalarlo en depósitos que sólo contengan relave producto de la flotación de cobre, se recomienda para el diseño, materiales que actualmente se usan actualmente en depósitos, como el PVC o HDPE, las tuberías usadas en minería se ofrecen como una opción para construir los flotadores, pero también se debe considerar estudiar la posibilidad de fabricar flotadores manufacturados.

Del mismo modo es factible económicamente en el norte de Chile, donde los indicadores como la TIR y el VAN demuestran que es rentable, aun así, este es sensible a las variaciones en el precio de la energía, por lo que se recomienda considerar una opción parecida a la de sin inclinación, es decir en configuración y en el uso de paneles más baratos.

# Dedicatoria

*Para mi Familia*

## **Agradecimientos**

Agradezco a Nathalia Fernández, por los días que me ha dado, por el apoyo que me ha brindado durante los años de carrera, por enseñarme y por ayudarme a entender lo que está fuera de lo racional, por acompañarme siempre que lo necesité y por haber sido mi pareja durante el arduo camino por conseguir el título.

A mis hermanos, que los amo mucho, que gracias a ellos llegué a estudiar y entrar a la carrera, que están conmigo incondicionalmente. A mis padres por el cariño, por las enseñanzas y por haberme mostrado como uno se debe enfrentar a la vida.

Y a todos los que me acompañaron en este proceso.

## Tabla de contenido

1	Introducción .....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivo general .....	2
1.3	Objetivos específicos.....	2
1.4	Alcances .....	2
2	Antecedentes generales .....	3
2.1	Industria minera.....	5
2.2	Problemas hídricos .....	9
2.3	Paneles fotovoltaicos.....	10
2.3.1	Paneles con inclinación .....	13
3	Metodología .....	14
4	Desarrollo .....	15
4.1	Estudio de mercado .....	15
4.2	Paneles fotovoltaicos flotantes .....	20
4.2.1	Paneles fotovoltaicos flotantes con seguimiento solar .....	25
4.3	Elementos de un parque fotovoltaico flotante.....	30
4.4	Flotadores para relaves.....	32
4.5	Diseño de la estructura .....	34
4.6	Disposición de las plantas en los depósitos.....	43
4.7	Evaluación económica.....	48
4.7.1	Energía.....	48
4.7.2	Disminución de la evaporación .....	51
4.7.3	Consideraciones generales.....	53
4.7.4	Inversión inicial.....	53

4.7.5	Flujos de caja.....	56
4.7.6	Análisis de sensibilidad.....	57
4.7.7	Proyecto financiado.....	59
5	Discusiones.....	60
6	Conclusiones .....	64
7	Bibliografía.....	66
	Anexo A .....	68
	Anexo B.....	70
	Anexo C.....	74
	Anexo D .....	89

## Índice de tablas

Tabla 4.1 Empresas socias del consejo minero de la I y II región.....	15
Tabla 4.2 Empresas socias del consejo minero de la III, IV, V, RM y VI región.....	16
Tabla 4.3 Diez depósitos de relave activos con mayor capacidad aprobada.....	20
Tabla 4.4 Características del lugar de los depósitos.....	20
Tabla 4.5 Resumen de las ventajas y desafíos de un PV flotantes en vez de PV en tierra.....	21
Tabla 4.6 Ventajas y desventajas de los tipos de paneles flotantes.....	22
Tabla 4.7 Detalle de las plantas PV flotantes construidas a partir de flotadores de Ciel et Terre...	24
Tabla 4.8 Resumen de los tipos de seguimiento y sus características principales.....	29
Tabla 4.9 Ángulo óptimo para seguimiento VSAT en depósito Laguna Seca.....	29
Tabla 4.10 Ángulo óptimo para seguimiento VSAT en depósito El Mauro.....	29
Tabla 4.11 Ángulo óptimo para seguimiento VSAT en depósito Ovejería.....	29
Tabla 4.12 Energía anual y factor de planta.....	30
Tabla 4.13 Beneficio energético por tener seguimiento por depósito.....	30
Tabla 4.14 Características del inversor.....	31
Tabla 4.15 Características de los paneles utilizados.....	31
Tabla 4.16 Datos de amperaje y voltaje de la planta.....	31
Tabla 4.17 Resumen de las características de los materiales a seleccionar.....	33
Tabla 4.18 Precios de tuberías para distintos diámetros.....	33
Tabla 4.19 Otros elementos que añaden peso a la estructura.....	36
Tabla 4.20 Características físicas de la tubería.....	36
Tabla 4.21 Diámetros disponibles para fabricar la estructura.....	36
Tabla 4.22 Diámetros disponibles con menor cantidad de personas por panel.....	37
Tabla 4.23 Inclinación de paneles para los distintos depósitos.....	37
Tabla 4.24 Distancia entre paneles para el depósito Ovejería.....	38
Tabla 4.25 Distancia entre paneles para el depósito El Mauro.....	38

Tabla 4.26 Distancia entre paneles para el depósito Laguna Seca. ....	38
Tabla 4.27 Distancia entre paneles para el depósito Laguna Seca con seguimiento VSAT.....	39
Tabla 4.28 Distancia de separación entre paneles con ángulo de inclinación .....	39
Tabla 4.29 Numeración de elementos del arreglo de paneles con seguimiento .....	42
Tabla 4.30 Área ocupada para un arreglo con paneles sin inclinación.....	43
Tabla 4.31 Área ocupada para un arreglo con paneles inclinados.....	43
Tabla 4.32 Área ocupada para el arreglo con seguimiento.....	44
Tabla 4.33 Abreviación para tablas. ....	49
Tabla 4.34 Energía generada anual y densidad de energía por área ocupada.....	50
Tabla 4.35 Comparación de paneles por energía generada en Laguna Seca .....	51
Tabla 4.36 Comparación de los datos de evaporación [16] y los de evapotranspiración.....	52
Tabla 4.37 Comparación de los datos de evaporación de la estación y del balance.....	52
Tabla 4.38 Área tapada en los distintos depósitos y plantas, con el total de agua resguardada. ....	53
Tabla 4.39 Precios de agua para los distintos depósitos.....	53
Tabla 4.40 Estimaciones de costo por construcción por watt peak del sistema. ....	54
Tabla 4.41 Tuberías para los diferentes arreglos.....	54
Tabla 4.42 Equipamiento de fijación de paneles para los diferentes arreglos.....	54
Tabla 4.43 Equipamiento de fijación para los diferentes arreglos. ....	55
Tabla 4.44 Costo de paneles por arreglo. ....	55
Tabla 4.45 Equipos eléctricos para un arreglo. ....	55
Tabla 4.46 Costo en equipamiento de las diferentes plantas.....	56
Tabla 4.47 Costos por construcción e ingeniería de un arreglo.....	56
Tabla 4.48 Costo de los flotadores instalados. ....	56
Tabla 4.49 Inversión total para las diferentes plantas. ....	56
Tabla 4.50 Resultados de los flujos de caja.....	57
Tabla 4.51 Resultados del flujo de caja cuando el precio de la energía aumenta en 25%.....	57

Tabla 4.52 Resultados del flujo de caja cuando el precio de la energía disminuye en 13%. .....	57
Tabla 4.53 Resultados del flujo de caja cuando el costo de los flotadores disminuye en 25%.....	58
Tabla 4.54 Costo en equipamiento para una disposición distinta de los paneles con inclinación...	58
Tabla 4.55 Resultados del flujo de caja con disposición de paneles con inclinación distinta.....	58
Tabla 4.56 Costo de los flotadores .....	58
Tabla 4.57 Resultados del flujo de caja cuando se cambian los flotadores por los de Ciel et terre.	59
Tabla 4.58 Resultados relevantes del préstamo.....	59
Tabla 4.59 Resultados del flujo de caja cuando se integra un préstamo .....	59

## Índice de figuras

Figura 2.1 Participación de energías renovables en producción de electricidad mundial. ....	3
Figura 2.2 Inversiones mundiales en energías renovables. ....	4
Figura 2.3 Capacidad y adición anual en capacidad de energía solar fotovoltaica .....	4
Figura 2.4 Participación de los tipos de energía en Chile .....	5
Figura 2.5 Estimación de presupuestos de exploración de metales ferrosos a nivel global. ....	5
Figura 2.6 Inversión minera por país.....	6
Figura 2.7 Reservas cupríferas por país. ....	7
Figura 2.8 Producción de cobre por país.....	7
Figura 2.9 Flujos de agua según fuente para la minería chilena año 2015.....	8
Figura 2.10 Los distintos tipos de disminuir la evaporación.....	10
Figura 2.11 Elementos principales de un panel fotovoltaico convencional .....	11
Figura 2.12 Concentración de energía solar en células fotovoltaicas.....	12
Figura 2.13 Distancia entre módulos.....	13
Figura 4.1 Distribución de depósitos por región según sus estados. ....	18
Figura 4.2 Métodos de construcción .....	18
Figura 4.3 Distribución de los depósitos de relave de interés por región.....	19
Figura 4.4 PV sobre flotadores.....	21
Figura 4.5 PV flotantes directamente sobre agua.....	21
Figura 4.6 Primera planta solar con seguimiento solar en corea del sur. ....	22
Figura 4.7 Sector de la planta solar en el embalse del Reino Unido. ....	23
Figura 4.8 La mayor planta solar fotovoltaica flotante. ....	23
Figura 4.9 Planta piloto con concentración fotovoltaica y seguimiento solar.....	25
Figura 4.10 Sistema de seguimiento ‘base rotatoria’. ....	26
Figura 4.11 Sistema de rotación de la base. ....	27
Figura 4.12 Sistema de seguimiento ‘Sun-Spotter’.....	27

Figura 4.13 Diseño de las 4 esferas, sistema de seguimiento.....	28
Figura 4.14 Diseño de la estructura flotante.....	34
Figura 4.15 Diseño de dos filas de paneles en tuberías de 6 metros .....	35
Figura 4.16 Elementos de inclinación para paneles .....	35
Figura 4.17 Paneles puestos longitudinal y perpendicular al tubo. ....	37
Figura 4.18 Tres filas de la estructura de un arreglo de paneles sin inclinación .....	39
Figura 4.19 Disposición de filas en arreglo con paneles inclinados.....	40
Figura 4.20 Diseño de seguimiento con estructura flotante de PVC.....	41
Figura 4.21 Disposición de elementos en estructura octogonal .....	41
Figura 4.22 Arreglo de la estructura con seguimiento.....	42
Figura 4.23 Segmento del diseño de la planta con seguimiento, ilustración del área incluida.....	43
Figura 4.24 Redes de distribución eléctrica cercanas al depósito. ....	44
Figura 4.25 Subestaciones eléctricas cercanas al depósito Ovejería. ....	44
Figura 4.26 Planta con inclinación y sin inclinación en depósito Ovejería.....	45
Figura 4.27 Simbología para figuras del IDE.....	45
Figura 4.28 Subestaciones y redes de transmisión. ....	46
Figura 4.29 Planta con inclinación y sin inclinación en depósito El Mauro .....	46
Figura 4.30 Redes de transmisión y subestaciones eléctricas cercanas al depósito Laguna Seca..	47
Figura 4.31 Planta con inclinación y sin inclinación en depósito Laguna Seca.....	47
Figura 4.32 Representación gráfica de la planta con seguimiento .....	48
Figura 4.33 Energía generada por planta con paneles sin inclinación.....	49
Figura 4.34 Energía generada por planta con paneles con inclinación.....	50
Figura 4.35 Energía generada en Laguna Seca. ....	50
Figura 4.36 Evaporación por mes en los depósitos de relaves. ....	52

# 1 Introducción

Actualmente el mayor consumo de energía a nivel mundial es a través de combustibles fósiles con una participación de un 78,3% [1], si se sigue con la misma producción actual de energía, el petróleo se acabará dentro de 60 años [2]. Por lo tanto, se debe contar con fuentes de energía alternativas.

Las energías renovables pueden ser variadas, dentro de las cuales está la hidráulica, la eólica y la solar, estas tres constituyen gran parte de la base de generación eléctrica limpia en Chile, aun así no es más del 30%<sup>1</sup> del total generado.

En el norte de Chile se encuentran los índices de radiación más altos del mundo y además se tiene grandes áreas disponibles debido a la baja densidad poblacional, pese a esto último, existe gran demanda energética debido a la gran cantidad de mineras las cuales consumen un tercio de la electricidad del país<sup>2</sup>

Las mineras presentan el sustento económico del país, por lo que comenzar a desarrollar proyectos de energías renovables para ellos es de suma importancia, por otro lado, unos de los tantos problemas asociados a la minería es la escasez de agua.

La escasez de agua no es un problema puntual de la minería, sino que es a nivel mundial, desde hace un tiempo se ha dado a conocer la poca cantidad de agua dulce que existe dentro del planeta con tan solo un 2,5% del total del agua existente [3], esto conlleva a tomar múltiples medidas de eficiencia hídrica y formas para preservar el agua.

La escasez de este recurso ha provocado que incluso las mineras tengan que desalinizar el agua que requieren, e incluso reutilizando esta, de hecho, los niveles de reutilización han ido aumentando a medida que pasan los años, pasando de una tasa de recirculación de 60% a un 70% en 5 años<sup>3</sup>.

## 1.1 Motivación

Satisfacer la demanda energética y en conjunto paliar la sequía, mediante la generación de energía renovable con paneles fotovoltaicos (de aquí en adelante PV), reformulando los PV flotantes e innovando al colocar estos en depósitos de relaves mineros, disminuyendo las pérdidas de agua por evaporación, es lo que incentiva el desarrollo de este estudio.

Por otra parte, el proyecto más parecido al que se propone es el de poner PV flotantes en una mina abandonada que se inundó de agua, entonces la realización de este tema significa una innovación importante, y cabe notar que el Estado ha logrado promover la innovación a través de la Corporación de Fomento de la

---

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Energía, <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/> [Consulta: 13/04/2017]

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Estadísticas, <http://nuevoportal.ine.cl/estadisticas/> [Consulta: 04/05/2017]

<sup>3</sup> Consejo minero, <http://www.consejominero.cl/ambitos-estrategicos/recursos-hidricos/> [Consulta: 13/04/2017]

Producción (Corfo) con programas como el programa “Contratos Tecnológicos para la Innovación” y el de “Innovación en Productos y Procesos Basados en Investigación y Desarrollo (I+D)”.

## **1.2 Objetivo general**

El objetivo general del estudio es evaluar técnica y económicamente la implementación de la tecnología fotovoltaica flotante en depósitos de relave mineros, con aplicación en la zona centro y norte del país.

## **1.3 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos son:

- Identificar y evaluar técnicamente las distintas tecnologías fotovoltaicas existentes en el mercado y seleccionar aquellas que serán consideradas en el estudio.
- Identificar y seleccionar técnicamente las alternativas de flotadores en cuanto a materialidad y forma.
- Proponer diferentes configuraciones de sistemas panel/flotador a nivel de perfil añadiendo la posibilidad de seguimiento del sol.
- Evaluar económicamente las configuraciones antes propuestas.

## **1.4 Alcances**

El estudio de mercado se realiza solo a través de información secundaria disponible y además la rentabilidad se compara con proyectos fotovoltaicos en tierra construidos en Chile.

Los estudios de evaluación de alternativas se realizan a nivel de perfil, como en una ingeniería conceptual y la opción escogida se desarrolla a nivel de ingeniería básica, ambas sumadas a la viabilidad económica da como acabado el estudio de factibilidad.

## 2 Antecedentes generales

En el mundo se está viviendo un proceso de cambio en la producción de energías, donde la generación con fuentes de energía no renovables está dando un paso atrás y está surgiendo un mayor interés por las energías renovables. Pese a eso las energías fósiles aun lideran la producción de electricidad, con una participación cercana al 75% [1].

La figura 2.1 muestra la baja participación de la energía solar fotovoltaica en el mundo, con tan solo un 1,2% del total, además se debe notar que 23,7% del total proviene de energías renovables, de estas energías renovables la que lidera en producción es la energía hidráulica. Pese a la baja participación se puede ver en la Figura 2.2 que las inversiones en energía solar superan por creces cualquier otro tipo de inversión.

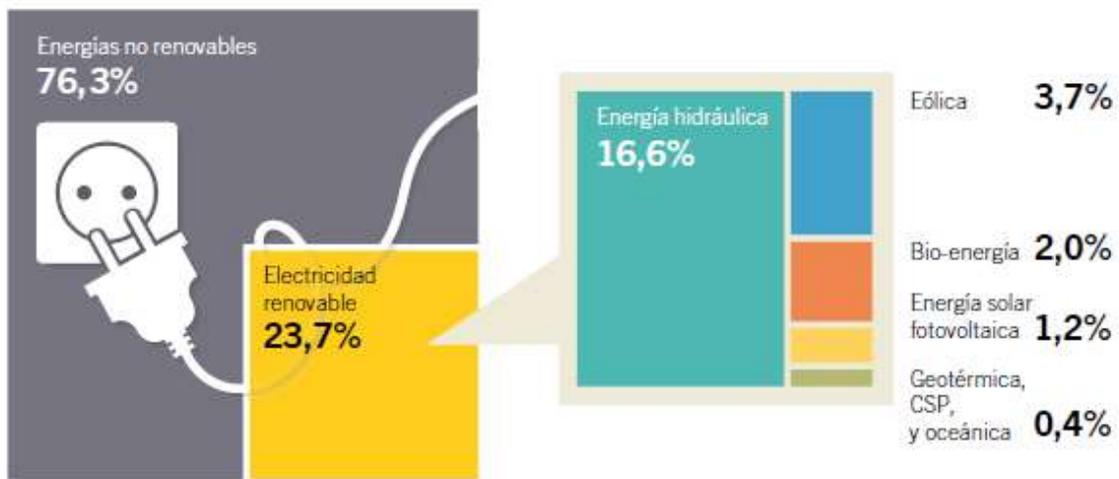


Figura 2.1 Participación de energías renovables en producción de electricidad mundial. Fuente: [1].

Lo mismo se quiere mostrar en la Figura 2.3 con la capacidad de generación, se nota su capacidad de producción con fuertes cambios en 5 años, y donde la adición anual aumenta cada año, por lo que se espera que continúe creciendo la capacidad de producción solar, esto no indica que las adiciones anuales también aumenten pese a la tendencia de hacerlo.

La adición anual de producción también se puede apreciar en la Figura 2.2 como un aumento en la inversión, según los cambios relativos al año anterior, se puede notar que la energía solar y la eólica muestran un crecimiento en su inversión, por el contrario de las otras formas de generación eléctrica que muestran un gran declive, es decir, se le asignó mayor financiamiento el año pasado que este año.

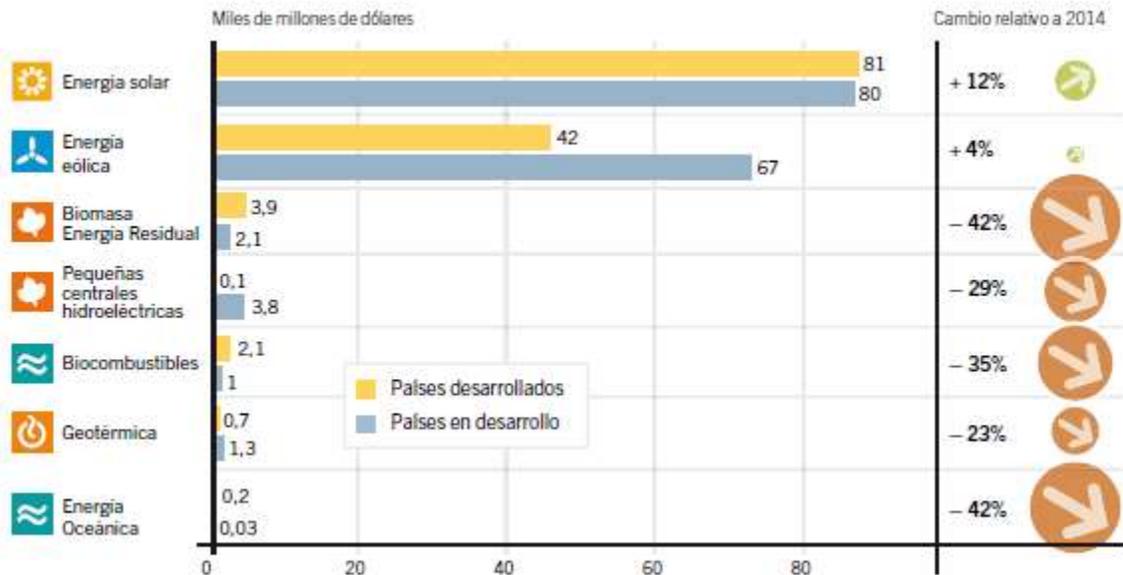


Figura 2.2 Inversiones mundiales en energías renovables. Fuente: [1].

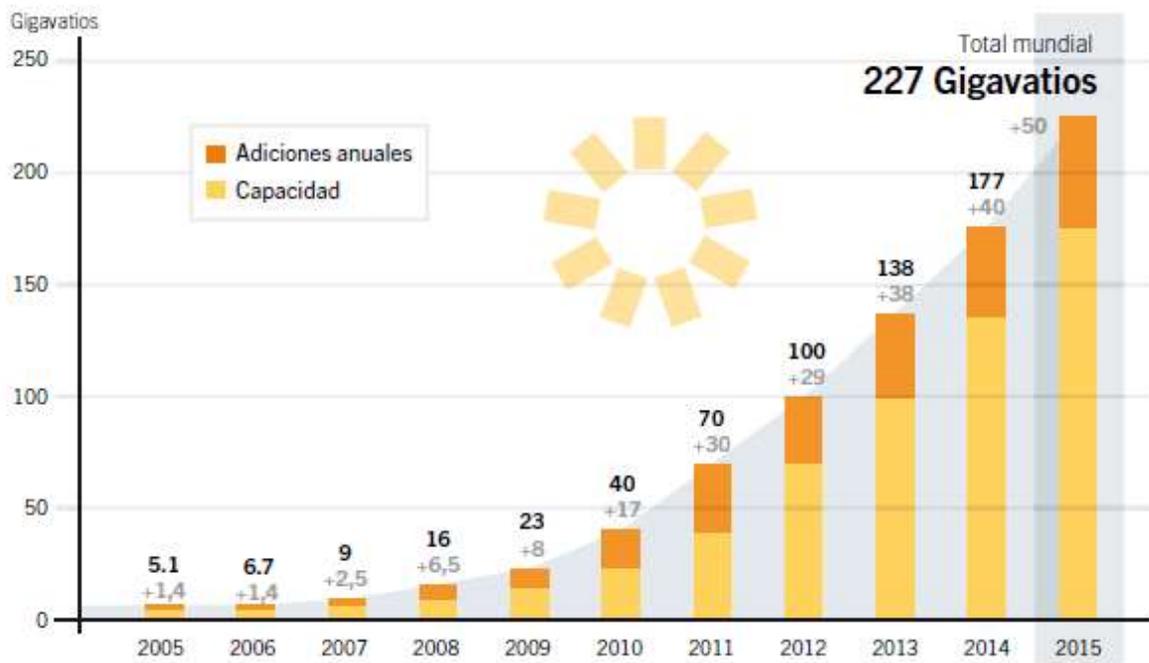


Figura 2.3 Capacidad y adición anual en capacidad de energía solar fotovoltaica Fuente: [1].

No es muy diferente en Chile, donde la producción está fuertemente regida por el gas natural, petróleo diésel y el carbón con un 55,95% de la generación eléctrica del país. Como se puede ver en la Figura 2.4, las fuentes renovables juegan un papel secundario en la producción, es por esto que se están haciendo fuertes incentivos para la generación de energías renovables, específicamente la energía solar fotovoltaica representa el 7,24% los cuales corresponden a 1665,19 MW de potencia

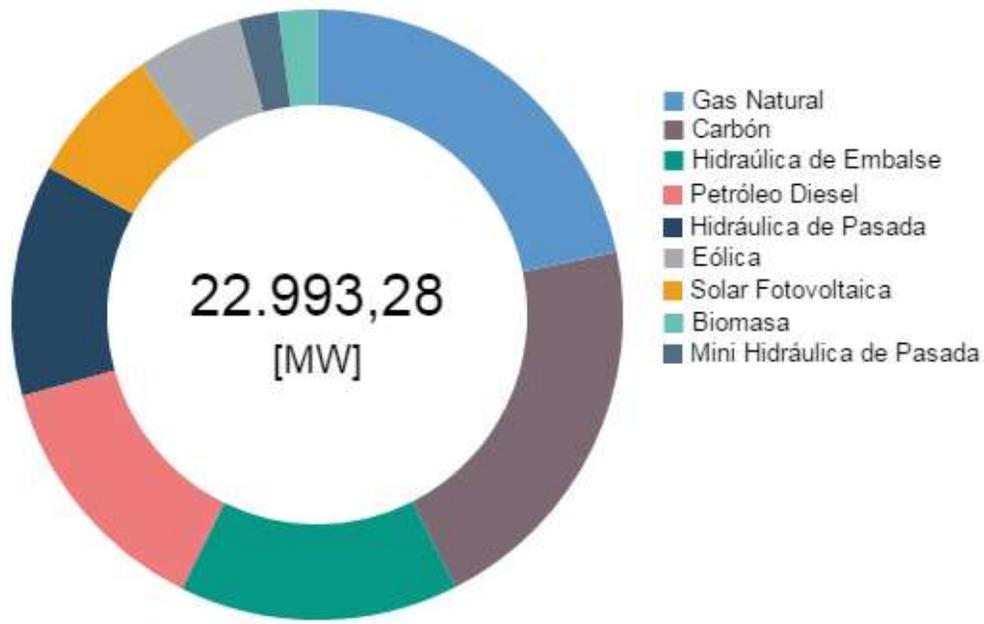


Figura 2.4 Participación de los tipos de energía en Chile. Fuente: Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía. Visto el 13/04/2017

## 2.1 Industria minera

La industria minera ha ido creciendo a nivel global de manera significativa, y esto se ha visto fuertemente reflejado en el aumento en las inversiones a nivel mundial en 20 años, como se puede ver en la Figura 2.5, además se muestra como el precio influye en los gastos para la exploración con retardos en algunos años.

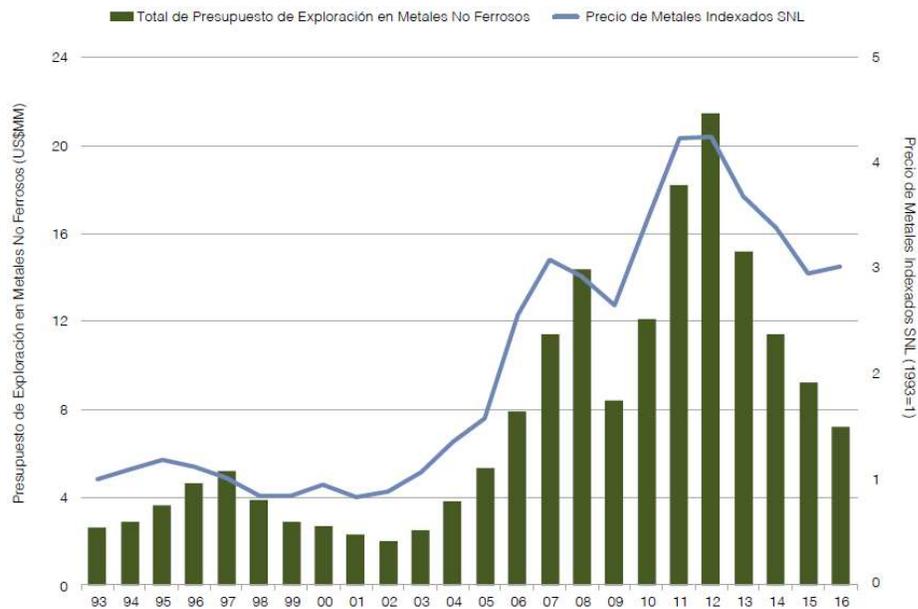


Figura 2.5 Estimación de presupuestos de exploración de metales ferrosos a nivel global. Fuente: S&P Global Market Intelligence

Luego de la fuerte baja en las inversiones para la exploración minera el año 2002 se tuvo un crecimiento sostenido con un máximo parcial el año 2008 que fue detenido en septiembre de ese año por un caos económico lo que resulto en caídas de 42% en la exploración. En ese entonces los precios de los metales ferrosos tuvieron un mínimo a principios del 2009.

Debido a la rápida recuperación de los precios de los metales en ese mismo año, las empresas aumentaron sus inversiones hasta llegar al récord histórico de US\$ 20,53 mil millones, después de eso las inversiones han ido en baja, lo cual se espera que pare para el 2017 debido a la nueva alza de precio que se puede notar en el año anterior.

Lo descrito anteriormente muestra la fuerte correlación que tiene el precio de los metales no ferrosos con el presupuesto para invertir en exploración a nivel mundial. Además, esta inversión es distribuida entre los distintos países como se muestra en la Figura 2.6, donde Chile se encuentra en el cuarto lugar con 7% del total de las inversiones.

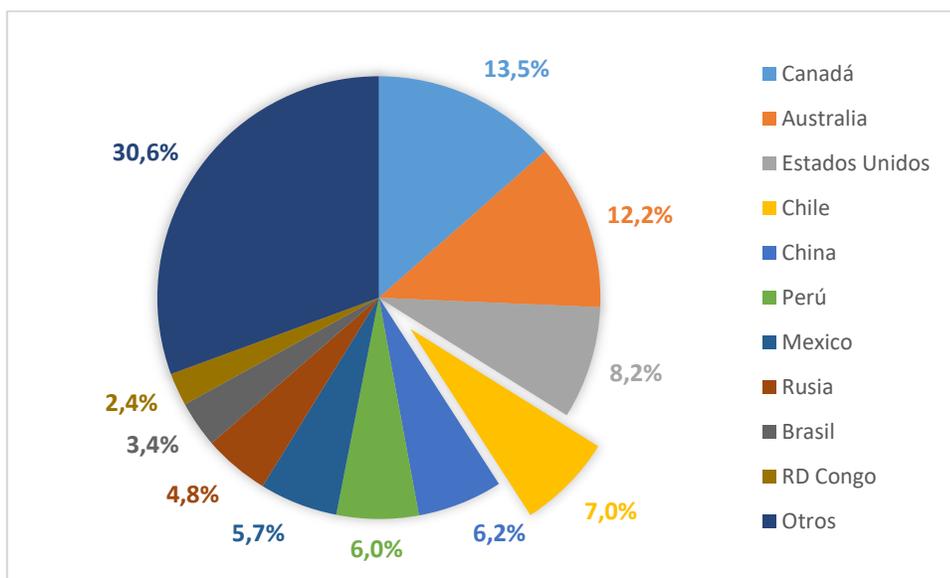


Figura 2.6 Inversión minera por país. Fuente: Elaboración propia a partir de SNL Metals & Mining 2015

Cabe destacar la participación de los países de América del norte y de América latina como Chile, Perú, México y Brasil que representan el 43,8% de la inversión mundial para la exploración.

Por otra parte, Chile cuenta con las mayores reservas cupríferas a nivel mundial, con una participación del 29,2%. Los que siguen son Australia y Perú con 12,4% y 11,2%, respectivamente, menos de la mitad de lo que tiene Chile. Como se muestra en la Figura 2.7.

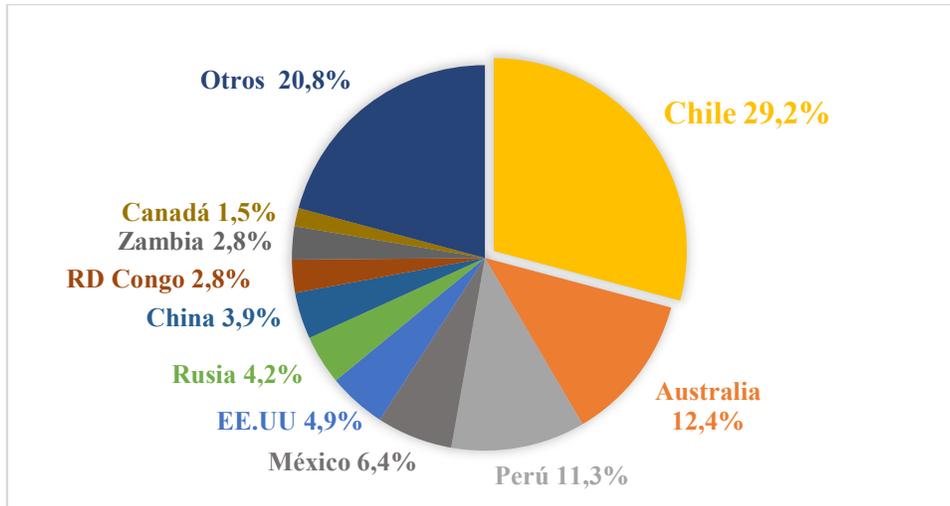


Figura 2.7 Reservas cupríferas por país. Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Geológico de Estados Unidos

Sumado a que Chile cuenta con las mayores reservas cupríferas del mundo, es el país que más produce cobre, por lo tanto, la economía del cobre a nivel mundial depende fuertemente de lo que pasa a nivel nacional, esto realza la importancia de las mineras en el país. Cabe destacar que, pese a que Australia tiene la segunda reserva más grande, se encuentra sexto en producción. Ver Figura 2.8

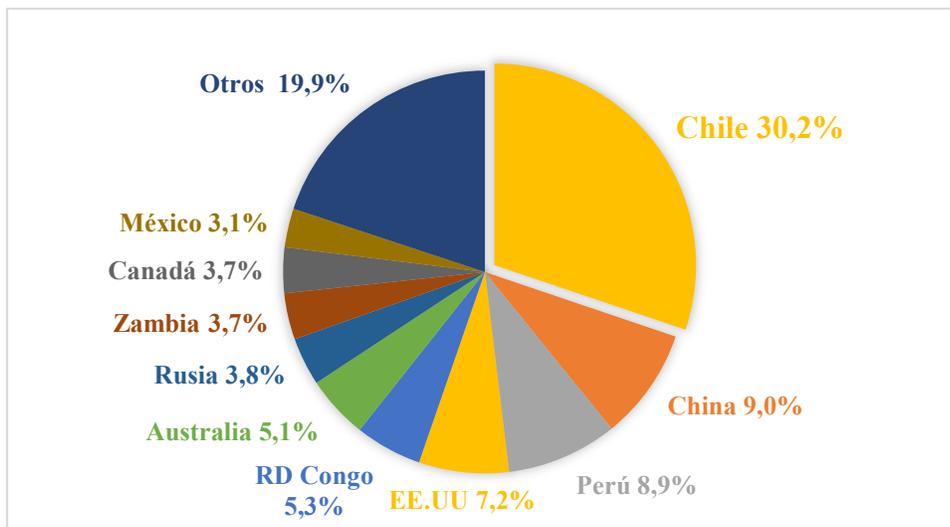


Figura 2.8 Producción de cobre por país. Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Geológico de Estados Unidos

El crecimiento del país viene fuertemente asociado con el crecimiento de las mineras, por ejemplo, el grado de participación de las mineras en el PIB es de un 11,2% el cuarto en participación a nivel de país<sup>4</sup>, con una participación similar a la industria manufacturera.

<sup>4</sup> <http://web.sofofa.cl/informacion-economica/indicadores-economicos/estructura-de-la-industria/> [Consulta: 14/10/2016]

Por otro lado, la Comisión Chilena del Cobre, en adelante Cochilco, en el informe “Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2016-2027”, que considera la proyección de producción del cobre en base a la cartera de proyectos vigentes y operaciones mineras actuales, por último, las estimaciones de producción según la condición y estado actual de las mineras.

Entrega como resultado esperado que el consumo hasta el 2027 aumente en 34,4% pasando de 21,9 TWh a 29,5 TWh, lo que representa una tasa de crecimiento anual de 2,7%, y en términos de potencia es agregar 1093 MW de generación eléctrica, de los cuales 586 MW serían para el SING y 507 MW para el SIC. La participación en el consumo nacional de energía eléctrica es de 32,4% al año 2015.

En el año 2014 según World Economic Forum<sup>5</sup> Chile ocupaba el puesto número 13 entre los países con el mayor precio de electricidad para la industria, lo cual ha cambiado considerablemente, en el mismo ranking para año 2017, Chile es el número 40 de 58 países, aun así, el costo de la energía eléctrica incide en 9% en los costos operacionales de las mineras.

Para el año 2027 se espera que los procesos de desalinización e impulsión de agua tome como segundo lugar en el consumo eléctrico de los procesos mineros, con una participación de 9%, y esto es debido al aumento en las operaciones de concentración el cual usa gran cantidad de agua y por lo que desalinizar agua es una de las mejores opciones.

Además Cochilco publicó un reporte del consumo de agua en la minería del cobre para el año 2015, el cual incluye el 99,6% de la producción chilena del cobre para ese mismo año. Dentro de este reporte dividen los tipos de fuentes de agua: continental, marina y reciclada. Donde la primera es toda agua proveniente de ríos, lagos, llanuras de inundación, reservas, humedales y sistemas salinos de interior. El agua reciclada es todo flujo de agua reinyectado al sistema, ya sea tratado o no.



Figura 2.9 Flujos de agua según fuente para la minería chilena año 2015. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco.

A partir de los dos informes anteriores, Cochilco elabora una proyección del consumo de agua en las mineras hasta el 2027, en donde se muestra que el uso de agua continental disminuye aproximadamente 2 m<sup>3</sup>/s mientras que el uso del agua de mar aumenta en casi 6 m<sup>3</sup>/s. El uso de agua de mar significa un

<sup>5</sup> <http://reports.weforum.org/global-energy-architecture-performance-index-2017/table-of-rankings/#series=ELECPRICEIND> [Consulta: 16/05/2017]

aumento en el costo de operación, primero porque las mineras generalmente no se encuentran cerca del mar y segundo por el mismo proceso de desalar el agua el cual requiere bastante energía.

Esto indica que el agua comienza a ser un bien escaso para la minería y además tiene asociado un problema económico, se espera que para el 2027 un 46% del agua requerida por la minería del cobre sea agua de mar, por lo tanto, tener pérdidas de esta agua conlleva problemas económicos directamente.

Los relaves contienen una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. Algunos de estos elementos alteran el medio ambiente por lo que se hace necesario almacenarlos en depósitos de relaves. En estos los sólidos van precipitando mientras que el agua es recuperada o evaporada. La gestión del agua en los depósitos de relaves se hace importante tanto para la recirculación del agua como para evitar la filtración de esta. En general las plantas de procesamiento de mineral se localizan cercano a los depósitos para disminuir los costos en transporte de relaves y reutilización del agua [4].

## 2.2 Problemas hídricos

La escasez de agua ya es una realidad en diferentes países, debido a la creciente demanda de alimentos y a los cambios climáticos, está afectará en poco tiempo a la población mundial, actualmente casi una quinta parte de la población mundial vive en áreas de escasez física de agua, lo cual indica que será una necesidad imperante del siglo XXI.

Chile también es afectado por la escasez hídrica, mayormente en el norte del país donde existe una baja cantidad de agua por persona, por otro lado, también ha afectado la zona centro del país la cual gran parte es para el uso agrícola.

Las principales causas que influyen en la escasez de agua son los cambios climáticos que provocan fluctuaciones en las futuras precipitaciones de agua, la infiltración de las napas subterráneas y la evaporación del agua.

Dentro del norte de Chile se ven afectadas varias faenas mineras, debiendo incluso parar la producción por falta de agua para los procesos, se suma a esto las grandes pérdidas de agua por evaporación existente en los relaves que son estimadas en un cuarto del total de perdidas, además el porcentaje de reutilización del agua en las mineras es del orden de un 75%.

Las formas de solucionar el problema de evaporación actualmente según Craig [5] son: esparcir tiras de polietileno o bolas de poliestireno expandido (plumavit); agregar una capa flotante; colocar una capa suspendida sobre el agua; mediante cubiertas modulares; y la última es con un polvo químico llamado poliacrilamida. A continuación, se explica cada uno y se muestra la capacidad de reducción de la evaporación según las pruebas prácticas que se realizaron.

Tiras de polietileno o bolas de poliestireno expandido: son pequeñas tiras o bolas de poliestireno expandido las cuales son esparcidas por el estanque, para tener una buena efectividad del método se debe inundar el espacio con este material. Reduce la evaporación entre 10% a 40% pero puede bajar la eficiencia dependiendo la fuerza del viento, debido a que puede arrastrar las tiras o puede juntarlas en un mismo sector, permitiendo que el agua tenga contacto con el sol.

Capa flotante: Es una capa la cual se deja en contacto directo con el agua, esta se debe sujetar de los extremos para que no se levante o se mueva. Reduce la evaporación entre 94% a 100%. Existen problemas

cuando se tienen lluvias o acarreo de objetos por el viento. También se puede posicionar agua de lluvia sobre la capa aumentando aún más la evaporación.

**Capa suspendida:** Mediante soportes dentro y fuera del tanque se extiende una capa la cual no toca el agua, solo es afirmada por los soportes. Reduce la evaporación entre 69% a 71%. Para superficies muy extensas, se vuelve un problema debido a la necesidad de soportes.

**Cubierta modular:** Flotadores los cuales son encajados modularmente, al ser modular permite adaptarse a cualquier tamaño o forma del lugar, dando la posibilidad de uso del mismo flotador. Estos reducen la evaporación entre 80% a 100%. Generalmente con cubiertas modulares no se consigue tapar toda una superficie completa, por lo que existirían pérdidas extras por esos sectores no consideradas en el porcentaje de reducción dado.

**Poliacrilamida:** Polvo químico que se esparce por el agua, pero que tiende a formar grupos cuando el agua se agita mucho. Reduce la evaporación entre 31% a 41%, existen complicaciones con este método cuando se tiene que reutilizar el agua para otro fin, debido que el agua queda este polvo químico.

La cubierta modular y la capa suspendida son los sistemas más parecido a la aplicación de PV flotantes, es decir los niveles de reducción de evaporación deberían estar dentro de los mismos rangos, se considerará la disminución de evaporación en un 69% para los casos donde se coloque paneles con inclinación y un 80% para los casos de paneles horizontales. En la Figura 2.10 se muestra imágenes de algunas formas de disminuir la evaporación.



Figura 2.10 Los distintos tipos de disminuir la evaporación. Fuente: [5]

### 2.3 Paneles fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico (de ahora en adelante PV) es un dispositivo capaz de transformar parte de la energía solar transmitida mediante radiación en energía eléctrica, este efecto lo hace gracias a las células fotovoltaicas que contiene cada celda del panel. Estas células tienen semiconductores los cuales al ser estimulados por radiación solar permiten el salto de electrones generando diferencias de potencial y movimiento de electrones, es decir corriente eléctrica.

En la actualidad existen diversos tipos de PV, los más utilizados también llamados convencionales, a grandes rasgos contienen los elementos que se pueden apreciar en la Figura 2.11. El elemento “Células de Alto Rendimiento” puede variar entre un panel y otro, existen células con composición principalmente de Silicio monocristalino, poli-cristalino y amorfo; como también existen de arseniuro de galio, telururo de cadmio y de diseleniuro de indio con cobre.

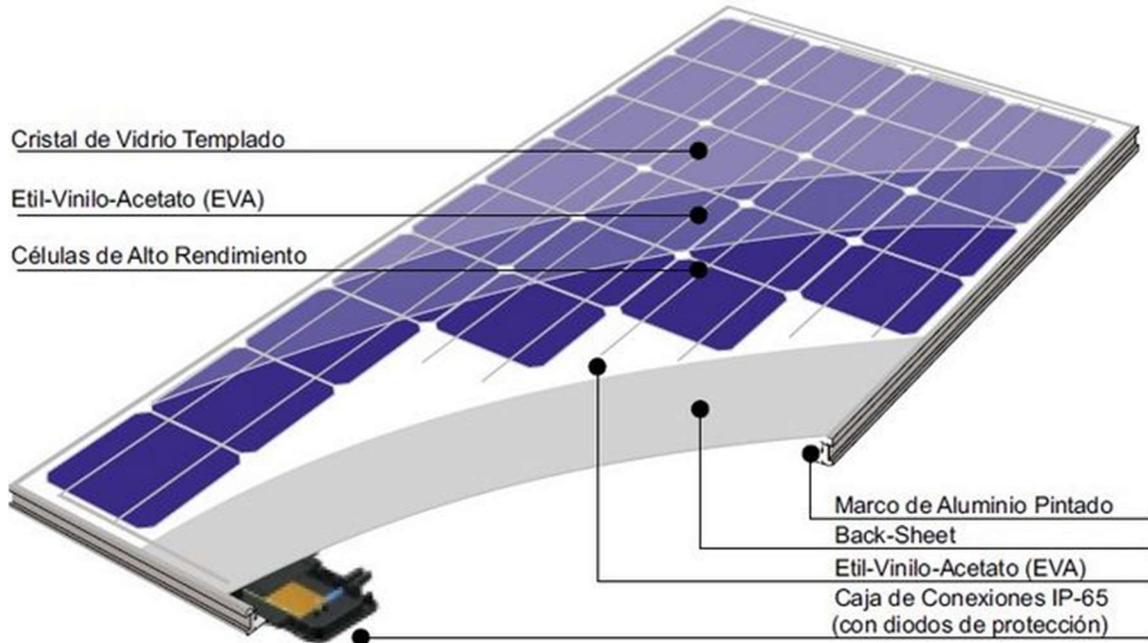


Figura 2.11 Elementos principales de un panel fotovoltaico convencional. Fuente: Global Energy Solar

La eficiencia de un panel fotovoltaico está dada principalmente por la naturaleza del material, la temperatura de la celda y la capacidad del cristal de vidrio para no reflejar la radiación, para ver como varia la eficiencia del panel según la temperatura de la celda, basta con aplicar la siguiente formula.

$$\eta = \frac{P}{E \cdot A}$$

Donde:

- P : Potencia eléctrica generada. [W]
- E : Irradiancia [W/m<sup>2</sup>]
- A : Área superficial de la celda. [m<sup>2</sup>]

Luego lo único que depende de la temperatura es la potencia eléctrica generada donde la dependencia se muestra en la fórmula que sigue.

$$P = P_{mp} \left( 1 + \frac{P_{max}}{100} (T_{celda} - 25) \right)$$

Donde:

$P_{mp}$  : Potencia máxima de la celda obtenida de las curvas características dadas por el fabricante.  
[W]

$P_{max}$  : Coeficiente de temperatura según  $P_{mp}$  . Dada por el fabricante. [%/°C]

$T_{celda}$  : Temperatura de la celda. [°C]

La elección de un tipo de celda depende, entre otras cosas, de su eficiencia, los con mayor eficiencia ordenados de mayor a menor son los de diseleniuro de indio con cobre (en unión con arseniuro de galio, germanio y GaInP<sub>2</sub>) o también llamado Tree-junction, arseniuro de galio y el de silicio monocristalino, los dos primero tienen un elevado costo, por otro lado están los más típicos en el mercado que son los de silicio amorfo y policristalino, mayor detalle se puede encontrar en el Anexo A, donde se muestra la eficiencia de cada tipo de celda fotovoltaica.

En el Anexo A, se puede encontrar que los paneles de un tipo han ido aumentando su eficiencia a medida que pasan los años, y también han salido tecnologías nuevas, las cuales no necesariamente tienen mayor eficiencia, como por ejemplo las Quantum dot cells creadas el 2010, son las celdas con más baja eficiencia con 8,6%, por otro lado, están las three-junction concentrator, las cuales tienen una eficiencia de 44,4%, las celdas con la mayor eficiencia alcanzada.

La eficiencia es considerada importante cuando la superficie es una limitante, en este estudio, la superficie puede ser una limitante para los depósitos pequeños, pero es mejor en términos de reducción de evaporación si se usa toda la superficie disponible. Por lo que la decisión de escoger un panel u otro no debería considerar la elección de paneles eficientes para disminuir el espacio, sino que escoger los paneles que retornen mayor ganancia, en términos económicos.

Las celdas también se pueden usar mediante una aplicación que es llamada concentración fotovoltaica, esta se divide en dos tipos, una funciona mediante lentes de Fresnel, estos son ubicados entre la celda y el sol, lo que provoca que los rayos que pasan por el lente son redirigidos a la celda. Y la otra funciona mediante la concentración de la radiación a través de espejos, estos son colocados en forma de parábola y en el foco se encuentra la celda, entonces la radiación que llegue al espejo se reflejará hacia la celda.

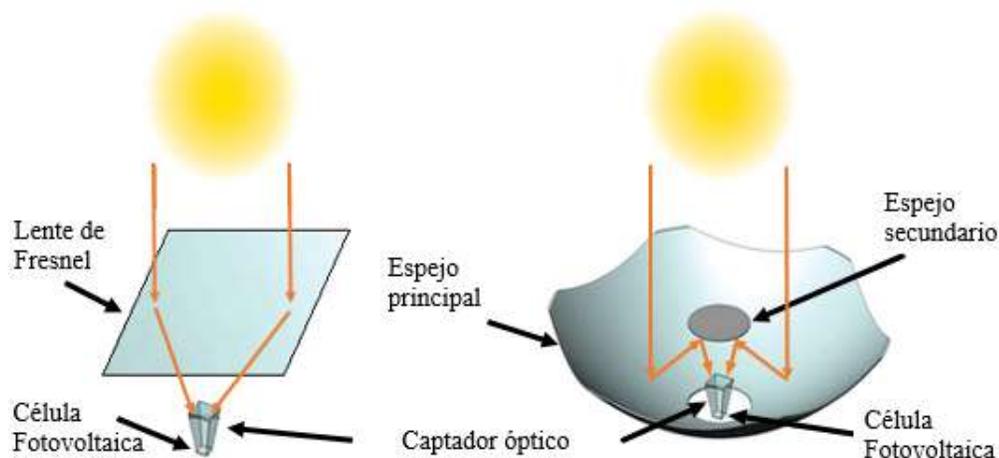


Figura 2.12 Concentración de energía solar en células fotovoltaicas. Fuente: Elaboración propia a partir de imagen de Solaflect.

### 2.3.1 Paneles con inclinación

Cuando se tienen paneles con inclinación, las filas más hacia el norte producirán sombra a las filas traseras si es que estas no tienen la separación adecuada, la norma española [6] recomienda tener una separación que asegure tener al menos 4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno. Esto se resuelve a través de ecuaciones de trigonometrías con las variables mostradas en la Figura 2.13.

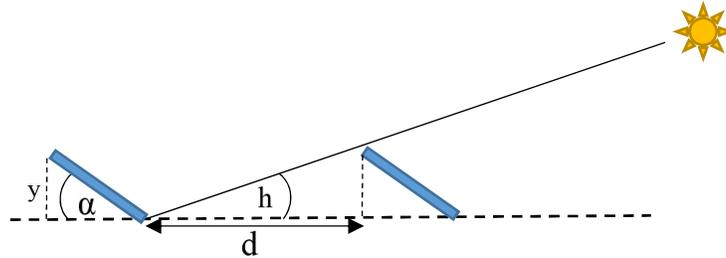


Figura 2.13 Distancia entre módulos. Fuente: Elaboración propia.

Esto supone que para el mediodía el sol se encuentra precisamente en el norte, es decir, el ángulo azimut igual a cero, se estima la declinación solar  $\delta$  como se muestra en la ecuación (1) a partir de la ecuación aproximada de Cooper (1969), donde 'n' es el día del año, donde el primero de enero es el día 1 y el 31 de diciembre es el día 365.

$$\delta(n) = 23,45 \left[ 360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right] \quad (1)$$

La altura solar  $h$  se puede determinar por relación geométrica y se expresa como se muestra en la ecuación (2).

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\phi)\text{sen}(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(AH) \quad (2)$$

Donde:

$\phi$ : Latitud.

$\delta$ : Declinación, posición angular del sol con respecto al plano ecuatorial celeste, al mediodía solar.

AH: Ángulo de la hora, el mediodía solar es el cero, cada  $15^\circ$  es una hora, donde las mañanas son negativas y las tardes positivas.

Por último 'd' que es la distancia entre la proyección de un módulo hacia el suelo y el inicio del otro módulo, se puede determinar a partir de la ecuación (3):

$$d = y/\tan(h) \quad (3)$$

Donde 'y' se puede expresar en función del largo del panel y la inclinación ' $\alpha$ ', con esto entonces se puede calcular la distancia entre módulos para cualquier latitud y para cualquier inclinación de este.

### 3 Metodología

Se realiza un estudio de mercado mediante la recopilación de los depósitos de relaves mineros activos existentes en Chile, en este estudio se incluye la demanda energética por parte de las mineras y los costos asociados a esta demanda, por último, el estudio abarca la demanda de agua que tienen las mineras y cuanta de esta proviene de fuentes reciclables o del depósito de relave minero asociado a la faena.

En el análisis técnico primero se da a conocer la composición física de los PV existentes y cuáles son sus características principales. Luego se procede a analizar los parques fotovoltaicos flotantes existentes, entregando datos como el área ocupada, la generación total y que paneles usan, de este modo se determinan las variables a considerar, para escoger los paneles y la disposición de ellos adecuadamente.

Se estudian los materiales que se pueden usar en los depósitos de relave, primero viendo la materialidad de relave de que se compone y el PH asociado, luego se realizan comparaciones según criterios como constructibilidad, resistencia, disponibilidad y flotabilidad, este último se mide solo por la densidad del material, con esto se define el principal material con el cual se construirán los flotadores y el formato de este según la disponibilidad del mercado.

Se escoge un tipo de PV y una forma de flotabilidad sobre los relaves, según criterios como la viabilidad técnica, la generación de energía y la disminución en la evaporación del relave. Luego de escogida la opción se completa la ingeniería conceptual del proyecto, específicamente dimensionando el espacio a utilizar por la planta, realizando un diseño básico del sistema flotador, viendo la posibilidad de seguimiento y realizando un layout de la planta.

Lo anterior supone las dimensiones del panel Yingli para el diseño, ya que el panel Ja Solar presenta mayor holgura en su formato, y que ambos paneles son muy parecidos en el aspecto constructivo. Asimismo, se realiza un solo plano del arreglo general por depósito para la disposición de paneles con y sin inclinación, aun así, se hacen planos de los arreglos para tener una noción de las dimensiones generales.

La energía total generada se calcula a través del modelo avanzado del explorador solar que utiliza el modelo de Sandía, donde se ingresan datos de la ficha técnica de los paneles, este modelo en conjunto con las otras herramientas de explorador solar no entrega un ángulo de inclinación óptimo para el caso de seguimiento VSAT, por lo que se decide iterar hasta encontrar el máximo de generación con una precisión de un grado.

Para los análisis de sensibilidad se realizan cambios que podrían ser esperables, como la variación del precio de la energía y la disminución del costo de los flotadores, por otra parte, se incluyen casos donde la disposición se cambia o se usa otro tipo de flotadores, estas últimas dos se refieren a un cambio en el diseño lo cual puede hacerse siempre y cuando se genere una mayor rentabilidad.

Por último, se realiza la viabilidad económica del proyecto, el cual se hace a través de un flujo de caja, cotizando los equipos y elementos necesarios para la construcción del PV flotante, junto a esto, se suman los costos asociados a la implementación y mantenimiento. Se estima el precio de la energía según lo impuesto por el Estado, además se estima la cantidad que se deja de evaporar y se calculan los ingresos del flujo de caja. Terminando con el análisis del VAN y TIR para saber si el proyecto es rentable.

## 4 Desarrollo

En esta sección se realiza el estudio técnico y económico del parque fotovoltaico flotante.

### 4.1 Estudio de mercado

Un conjunto de mineras que representan el 97% de la producción de cobre y molibdeno y que forman parte del Consejo Minero, representan el 55% de producción de oro y el 71% de plata. Estas mineras se mencionan en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2 junto a los complejos mineros, el producto, la propiedad del sitio, y la producción de cobre en toneladas por año.

Tabla 4.1 Empresas socias del consejo minero de la I y II región. Fuente: Elaboración propia a partir de información del Consejo Minero.

Complejo minero	Productos	Compañía	Propiedad	Producción de cobre (ton/año)
Cerro Colorado	Cobre	BHP Billiton Pampa Norte	BHP Billiton	74.400
Doña Inés de Collahuasi	Cobre y molibdeno	Cía. Minera Doña Inés de Collahuasi	Anglo American plc (44%), Glencore (44%) y JCR (12%)	455.300
Quebrada Blanca	Cobre	Cía. Minera Quebrada Blanca	Teck (76,5%), Inversiones Mineras S.A. (13,5%) y Enami (10%)	39.100
Antucoya	Cobre	Minera Antucoya	Antofagasta Minerals (70%) y Marubeni Corp. (30%)	12.200
El Abra	Cobre	Sociedad Contractual Minera El Abra	Freeport-McMoRan (51%) y Codelco (49%)	147.200
Radomiro Tomic	Cobre	Codelco	Estado de Chile	315.700
Chuquicamata	Cobre, molibdeno,	Codelco	Estado de Chile	308.600
Ministro Hales	Cobre	Codelco	Estado de Chile	238.300
Michilla	Cobre	Minera Michilla	Antofagasta Minerals	29.400
Spence	Cobre	BHP Billiton Pampa Norte	BHP Billiton	175.600
Sierra Gorda	Cobre, molibdeno y oro	Sierra Gorda SCM	KGHM International (55%), Sumitomo Metal Mining (31,5%) y Sumitomo Corporation (13,5%)	130.000
Centinela	Cobre y oro	Minera Centinela	Antofagasta Minerals (70%) y Marubeni Corp. (30%)	221.000
Gabriela Mistral	Cobre	Codelco	Estado de Chile	125.000
Lomas Bayas	Cobre	Cía. Minera Lomas Bayas	Glencore	71.000
Zaldívar	Cobre	Cía. Minera Zaldívar	Antofagasta Minerals (50%) y Barrick (50%)	103.400
Escondida	Cobre	Minera Escondida Ltda	BHP Billiton (57,5%), Río Tinto (30%) y otros inversionistas (12,5%)	1.152.500
Altonorte	Fundición	Complejo Metalúrgico Altonorte	Glencore	303.000
Franke	Cobre	Franke SCM	KGHM International	22.000

La Tabla 4.1 contiene las mineras de la I y la II región, mientras que la Tabla 4.2 contiene las otras regiones tales como III, IV, V, RM, VI región.

*Tabla 4.2 Empresas socias del consejo minero de la III, IV, V, RM y VI región. Fuente: Elaboración propia a partir de información del Consejo Minero.*

Complejo minero	Productos	Compañía	Propiedad	Producción de cobre (ton/año)
Salvador	Cobre, molibdeno,	Codelco	Estado de Chile	48.500
La Coipa	Oro y plata	Cía. Minera Mantos de Oro	Kinross	-
Maricunga	Oro	Cía. Minera Maricunga	Kinross	-
Ojos del Salado	Cobre y oro	Cía. Contractual Minera Ojos del Salado	Lundin Mining Corporation (80%) y Sumitomo Corp. (20%)	24.700
Candelaria	Cobre y oro	Cía. Contractual Minera Candelaria	Lundin Mining Corporation (80%) y Sumitomo Corp. (20%)	150.100
Caserones	Cobre y molibdeno	SCM Minera Lumina Copper Chile	Pan Pacific Copper (77,4%) y Mitsui & Co. Ltd. (22,6%)	150.000
Carmen de Andacollo	Cobre	Cía. Minera Teck Carmen de Andacollo	Teck (90%) y Enami (10%)	71.800
Altos de Punitaqui	Cobre	Minera Altos de Punitaqui	Glencore	8.000
Los Pelambres	Cobre y molibdeno	Minera Los Pelambres	Antofagasta Minerals (60%), Nippon LP Resources BV (25%) c m y MM LP Holding (15%)	363.200
Ventanas	Fundición y refinería	Codelco	Estado de Chile	-
El Soldado	Cobre	Anglo American Sur	Anglo American plc (50,1%), JV Codelco-Mitsui (29,5%) y Mitsubishi Corp. (20,4%).	36.000
Chagres	Fundición	Anglo American Sur	Anglo American plc (50,1%), JV Codelco-Mitsui (29,5%) y Mitsubishi Corp. (20,4%).	-
Andina	Cobre y molibdeno	Codelco	Estado de Chile	224.200
Los Bronces	Cobre y molibdeno	Anglo American Sur	Anglo American plc (50,1%), JV Codelco-Mitsui (29,5%) y Mitsubishi Corp. (20,4%).	401.700
El Teniente	Cobre, molibdeno y fundición	Codelco	Estado de Chile	471.100

Existe una definición en la ley 16.624 en la cual las empresas que produzcan más de setenta mil toneladas de cobre al año, serán comprendidas dentro de la categoría Gran Minería del Cobre de Chile, en las tablas anteriores existen 21 compañías mineras que se encuentran en aquella categoría, pese a eso, los dueños mayoritarios se repiten, los cuales solo son 10 y están enlistados a continuación: el Estado de Chile (Codelco), Anglo American plc, Antofagasta Minerals, Teck, Pan Pacific Copper, Lundin Mining Corporation, Glencore, BHP Billiton, KGHM International, Freeport-McMoRan.

El Departamento de Depósitos de Relaves del Servicio Nacional de Geología y Minería, en adelante Sernageomin entrega un catastro actualizado en diciembre de 2016 de los depósitos de relave existentes en Chile, el cual es usado para obtener la información como origen, tipo y tamaño de los depósitos en Chile.

Hay 325 mineras distintas que tienen un relave asociado según este catastro, pese a los 33 complejos mineros mostrados en las tablas anteriores que poseen el 97% de la producción de cobre y más de la mitad de la producción de oro y plata. De Ahí se obtienen 696 depósitos de relaves, y en la mayoría de los casos, con más de un depósito por minera.

Estos depósitos se encuentran en diferentes tipos: embalse, en pasta, espesado, filtrado, pretiles de relave y tranques de relave. Los cuales pueden encontrarse en tres estados: activo, abandonado y no activo. Y pueden tener a grandes rasgos tres métodos diferentes de construcción: aguas abajo, aguas arriba y en eje central.

Es denominado embalse cuando el muro de contención es construido por material ajeno al relave, como roca o material particulado extraído previamente del lugar, de estos existen 105 en Chile, donde la gran mayoría se concentra en la cuarta región.

Los depósitos como los espesados, en pasta y filtrados, son aquellos donde se recupera un porcentaje de agua, de los depósitos filtrados existen 7, los cuales son más efectivos para recuperar el agua dejando aproximadamente un 20 % de humedad en el relave, entre los espesados y en pasta suman 9 en Chile.

Los depósitos como pretiles de relave, como su nombre lo dice, es un muro de contención que sostiene el relave, de este tipo existe solo uno en el país el cual se encuentra en la tercera región en la provincia de Chañaral perteneciente a la empresa Codelco, el cual no se encuentra activo.

El depósito de relave que más existe es el llamado tranque, donde el muro de contención es construido a partir del mismo relave con la fracción más gruesa de este. De estos existen 567 de un total de 696. Cabe destacar que existen solo 8 depósitos que no entran en ninguna de estas categorías o no existe información concluyente y están ubicados en la provincia del Elqui.

Para este estudio se considera los depósitos que contengan una porción considerable de agua y que la pulpa no sea tan agresiva, por lo tanto, se hace de interés los depósitos como los embalses y los tranques, debido que estos no tienen sistemas para recuperar el agua y además como tienen mayor porcentaje de agua su pulpa se ve más amortiguada. Por otra parte, solo se considerarán depósitos de relaves producidos por la flotación del cobre. Entonces su pulpa generalmente precipitará dejando una laguna de agua sobre el relave.

Este catastro muestra que existen 112 depósitos de los nombrados anteriormente que están activos, y 432 que no están activos. Como se puede ver en la Figura 4.1 la gran mayoría de depósitos de relaves se encuentran en la cuarta y tercera región.

Notar además que a nivel nacional la cantidad de depósitos abandonados excede a la de los activos. Esta brecha ha ido aumentando en estos últimos años debido a la baja fiscalización por parte de los organismos públicos y Sernageomin.

Se debe destacar que más de la mitad de los relaves abandonados se encuentra en la cuarta región, y es aquí donde además existen la mayor cantidad de depósitos de relaves no activos. Para este estudio solo se considera depósitos de relaves activos, ya que en ellos las mineras podrían estar interesadas en trabajar, debido a que es de ahí donde se extrae el agua reutilizada.

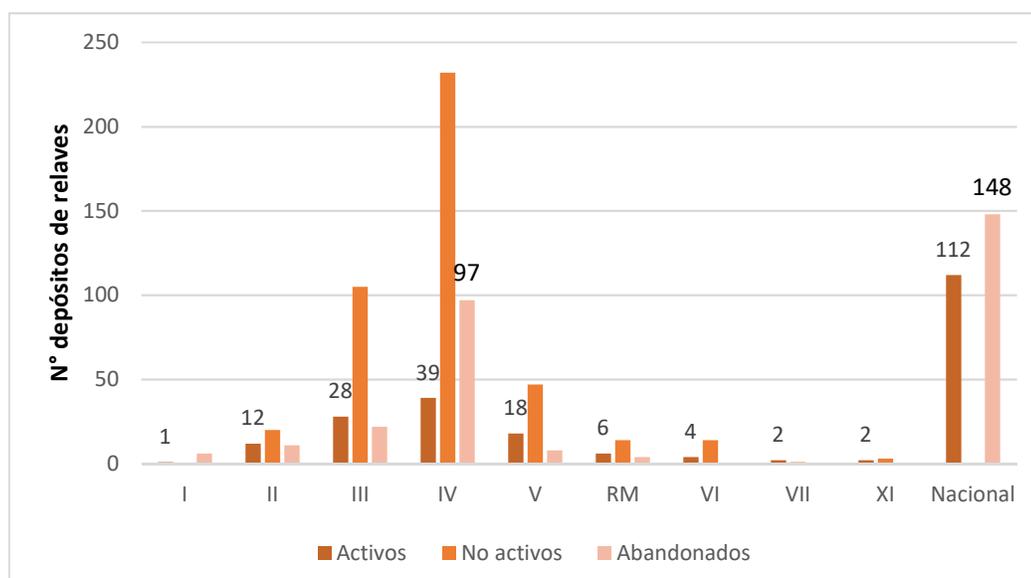


Figura 4.1 Distribución de depósitos por región según sus estados. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Sernageomin

Los depósitos abandonados pueden ser una buena fuente de espacio, por ejemplo, en Andacollo gran parte del suelo es usado para los relaves, claramente se podría aprovechar este espacio para la generación eléctrica para la comuna. Solo en esta comuna existen 110 depósitos de relaves abandonados y no activos. Cabe destacar que no todos ellos poseen agua en su superficie, por lo que no se podría aprovechar la capacidad de disminuir la evaporación

Con respecto al método de construcción, se mencionó que existen tres, esquematizados en la Figura 4.2, todos ellos se basan en la forma en que se aumenta el tamaño del depósito, el de aguas arriba es el más utilizado debido a su bajo coste, éste funciona colocando nuevas presas sobre la anterior y sobre el mismo relave. Dentro de todas es la más insegura debido a su inestabilidad física.



Figura 4.2 Métodos de construcción. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Wise-Uranium Project

También se puede aumentar el tamaño de los depósitos de la forma aguas abajo donde las nuevas presas se van colocando exteriormente, estas requieren mayor movimiento de tierra, y por último está la de eje central la cual las nuevas presas se colocan totalmente sobre la anterior.

En este caso se consideran todos los depósitos sin importar el método de construcción, por lo tanto, a modo de resumen, se consideran depósitos de relaves del tipo embalse y tranque, debido a que son los que tienen mayor porcentaje de agua y que estén activos. Desde ahora son llamados por depósitos de relave o de interés indistintamente.

El estudio considera la zona centro y norte del país, según una división hecha para la Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo [7], la zona centro y norte correspondería las regiones superiores a la sexta, incluyéndola, en este caso y según los relaves existentes, se omite la VII y la XI región las cuales constan de ocho relaves, entre activos y no activos.

Por lo tanto, considerando solo los depósitos de interés en la zona centro y norte del país, se tiene la distribución mostrada en la Figura 4.3, donde se nota la clara predominancia de depósitos en la IV región, incluso se puede observar una tendencia a disminuir la cantidad de depósitos a medida que alejan de esta región.

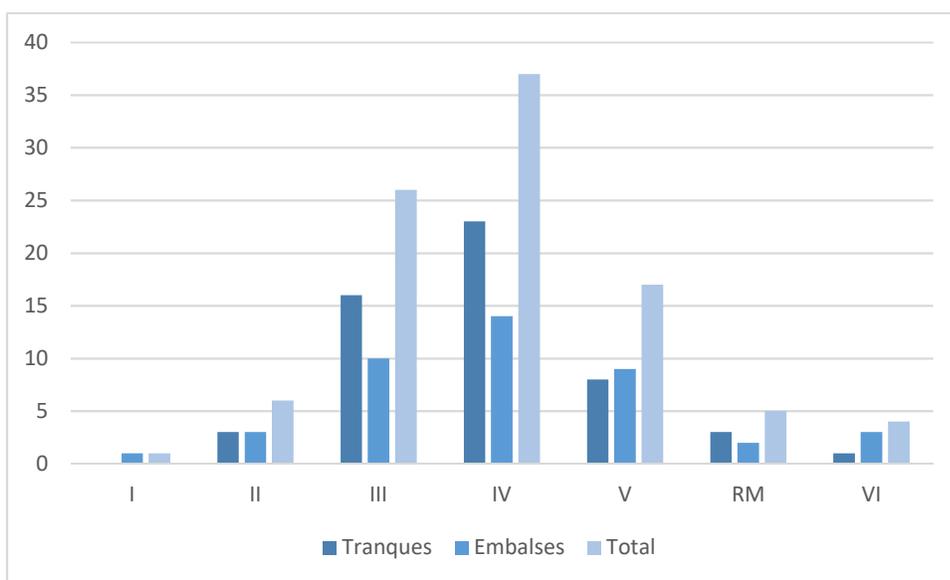


Figura 4.3 Distribución de los depósitos de relave de interés por región. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Sernageomin

Para efectos de la evaluación técnica y económica se consideran tres depósitos de relaves con gran capacidad aprobada, ver Tabla 4.3. Según la figura anterior, es natural elegir un depósito de relave en la IV región debido a la gran cantidad existente, luego el depósito El Mauro es el primer depósito escogido, por otro lado, también se escogerá el depósito Laguna Seca porque se encuentra más al norte y el último será el depósito Ovejería el cual se ubica más al sur en la región metropolitana, los últimos dos se escogen debido a que se tiene disponible el balance hídrico en la bibliografía.

La superficie de los depósitos de relaves se encuentra disponible para el año 2015, en este catastro de los 718 depósitos solo se tiene información de 405, además cabe destacar que esta es una variable que depende de la producción, de la época del año, y del uso que le estén dando.

El embalse de Laguna Seca de la minera Escondida tiene la mayor superficie de relave con 29,4 km<sup>2</sup>, el depósito Ovejería tiene 8,6 km<sup>2</sup>, el depósito El Mauro tiene 2,7 km<sup>2</sup> y el depósito con menor área es del Departamento de Minas de la Universidad de La Serena con solo 40 m<sup>2</sup>. El área total de los depósitos de relaves suma 175,8 km<sup>2</sup>, considerando solo los depósitos de interés se tienen 123,4 km<sup>2</sup>, es decir 70,2% del total del área.

Tabla 4.3 Diez depósitos de relave activos con mayor capacidad aprobada. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Sernageomin

Empresa	Faena	Región	Deposito	Ton. actual	Ton. aprobado
Minera Escondida	Escondida	II	Laguna Seca	1.062.478.064	4.500.000.000
Codelco	El Teniente	RM	Carén	1.127.734.790	3.288.000.000
Codelco	Chuquicamata	II	Talabre	1.652.381.629	2.103.950.000
Codelco	Andina	RM	Ovejería	414.446.533	1.930.000.000
Minera Los Pelambres	Faena Los Pelambres	IV	El Mauro	425.028.220	1.700.000.000
SCM Sierra Gorda	Proyecto Sierra Gorda	II	Sierra Gorda	48.296.605	1.350.000.000
Doña Inés de Collahuasi	Collahuasi	I	Pampa Pabellón	660.523.252	1.040.000.000
Anglo American	Los Bronces	RM	Las Tórtolas	549.791.441	1.000.000.000
Minera Centinela	Proyecto Esperanza	II	Esperanza	156.999.074	750.000.000
Lumina Copper Chile	Caserones	III	Arenas El Tambo	4.730.465	570.000.000

En la Tabla 4.4 se muestra la localización de los depósitos con la latitud y longitud, se indica el área estimada del depósito, como también el promedio de la radiación directa normal en un año, esto último a través de información obtenida del explorador solar del ministerio de energía

Tabla 4.4 Características del lugar de los depósitos. Fuente: Elaboración propia a partir de información del Explorador solar.

Deposito	Latitud	Longitud	Área [ha]	Radiación anual kWh/m <sup>2</sup> /día
Laguna seca	-24,41°	-69,12°	2.935,5	10,90
El mauro	-31,96°	-71,03°	268,87	8,28
Ovejería	-33,04°	-70,80°	857,63	7,82

Cabe destacar que existen 52 depósitos de interés que tienen disponible la información de la superficie, de estos la mediana de la superficie es de 12,24 ha y el promedio de las superficies es 234,77 ha. De estos depósitos 37 tienen una superficie mayor a 1 ha, la cual se considera una superficie adecuada para cálculos posteriores. Ya que se calcula aproximadamente 1 MW peak por hectárea.

## 4.2 Paneles fotovoltaicos flotantes

Se le denomina PV flotante a los PV que se encuentran sobre el agua, esto puede ser mediante ayuda externa como con un flotador, ver Figura 4.4, o también puede ser en contacto directo con el agua, ver Figura 4.5. Estas plantas funcionan igual que cualquier otra planta fotovoltaica instalada en tierra, solo que gran parte del equipamiento tiene que estar sobre el agua, por ejemplo, se ve en la Figura 4.4 como los cables tienen que pasar por el agua mediante la ayuda de flotadores.



Figura 4.4 PV sobre flotadores. Fuente: Kyocera Solar



Figura 4.5 PV flotantes directamente sobre agua. Fuente: [8]

Los dos tipos de construcción de PV flotantes sobre el agua tienen un común de ventajas y desafíos en comparación con los PV sobre la tierra, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resumen de las ventajas y desafíos de un PV flotantes en vez de PV en tierra. Fuente: Elaboración propia.

Tipos de paneles	Flotantes
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución en la temperatura global del panel, lo que provoca una mayor eficiencia.</li> <li>- Evita la creación de microorganismos o algas debido a la falta de sol.</li> <li>- Reduce considerablemente las pérdidas de agua por evaporación.</li> <li>- Disminuye el uso de territorio terrestre el cual puede ser ocupado para otros fines.</li> <li>- Reduce esfuerzos en la instalación.</li> </ul>
Desafíos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peligros asociados entre la electricidad y el agua</li> <li>- Alta humedad en el ambiente</li> <li>- Corrosión que puede sufrir la base de los paneles</li> <li>- Mantener los organismos vivos que necesitan luz solar para su normal funcionamiento</li> <li>- Resistir posibles remezones repetitivos producto del movimiento del agua.</li> <li>- Movimiento del agua puede provocar una incorrecta inclinación de los paneles</li> <li>- Fatiga en uniones debido al movimiento de la base.</li> </ul>

Por otra parte, existen diferencias notorias entre un tipo de instalación u otro, las cuales se dan a conocer en la Tabla 4.6, en la cual se dan las ventajas y desventajas que tienen los PV flotantes sobre flotadores, y los PV flotantes que están en contacto directo con el agua [8].

Tabla 4.6 Ventajas y desventajas de los tipos de paneles flotantes. Fuente: Elaboración propia.

Tipos de paneles	Sobre flotador	Directo sobre agua
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite un seguimiento al sol.</li> <li>- Permite grado de inclinación lo que da mayor radiación.</li> <li>- Puede existir un espacio para la mantención</li> <li>- La corrosión por contacto del agua afecta al flotador y no al panel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil instalación, debido a que no necesita grandes soportes.</li> <li>- Mayor eficiencia que sobre flotador debido al contacto directo con el agua</li> <li>- Menores esfuerzos en las uniones</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran volumen de elementos a instalar</li> <li>- Aumenta el costo de construcción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se debe desmontar todo para poder hacer una mantención</li> <li>- Problemas locales no se pueden resolver dentro del agua.</li> <li>- La corrosión afecta a los paneles.</li> </ul>

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de plantas fotovoltaicas construidas sobre el agua. Una de las más características es la Sunflower Solar Plant Figura 4.6 construida en Corea del sur, tiene una potencia peak de 465 kWp (kilo Watt peak), la cual ocupa 8000 m<sup>2</sup> de superficie, construida a partir de 1550 módulos PV de celdas policristalinas, esta planta es la primera en integrar un sistema de rotación, para tener una mayor exposición a la radiación solar, logrando una eficiencia 22% mayor que una montada en suelo. Ocupa 1,72 ha por MW



Figura 4.6 Primera planta solar con seguimiento solar en corea del sur. Fuente Arirang NEWS.

Otro ejemplo de planta es la mayor existente en Europa, la cual se ubica en el embalse “Queen Elizabeth II” en Reino Unido Figura 4.7 con una potencia peak de 6,33 MWp, esta ocupa un área de 57.500 m<sup>2</sup>, construida a partir de 23.046 módulos PV de celdas monocristalinas. Esta planta se mantiene en el agua a partir de flotadores de plástico llenos de aire. Ocupa 0.91 ha por MW

Dentro de la empresa Ciel et Terre se tiene registro disponible<sup>6</sup> de cada una de las plantas fotovoltaicas construidas con el tipo de flotadores como los que se muestran en la Figura 4.7. Esta empresa tiene registrada 43 plantas que usan este tipo de flotadores, donde la mayor de estas es la segunda planta

<sup>6</sup> <http://www.ciel-et-terre.net/our-floating-solar-power-plants-references/> [Consulta: 11/04/2017]

más grande del mundo con 7550 KWp con 0,98 ha por MW, por otra parte, la menor es de 5,39 KWp con 1,86 ha por MW.



*Figura 4.7 Sector de la planta solar en el embalse del Reino Unido. Fuente: The Guardian.*

La mayor planta solar PV flotantes la que se muestra en la Figura 4.8 con 20 MWp instalados, construida en la provincia Anhui en China. La cual está sobre una inundada subsidencia provocada por una mina de carbón. El proyecto busca generar 300 MW con una superficie cercana a 6,7 km<sup>2</sup>, es decir 2,23 ha por MW.



*Figura 4.8 La mayor planta solar fotovoltaica flotante. Fuente: Anhui Energy Administration.*

A continuación, en la Tabla 4.7, se muestran distintas plantas PV flotantes instaladas por la empresa Ciel et Terre que ocupan una superficie mayor a una hectárea, con esto se muestra la capacidad instalada, la marca del panel, su potencia peak, la superficie ocupada y la cantidad de hectáreas que usa por MW, a partir de esta información se analizan algunas opciones de paneles fotovoltaicos para usar en este estudio.

Tabla 4.7 Detalle de las plantas PV flotantes construidas a partir de flotadores Ciel et Terre. Fuente: Ciel et Terre.

Planta	Capacidad [kW <sub>p</sub> ]	Panel	Potencia peak [W <sub>p</sub> ]	Superficie [ha]	[Ha/MW]
Umenoki	7.550	Yingli	275	7,43	0,98
QE2	6.338	Suntech	270	5,95	0,94
Godley	2.991	Ja Solar	285	2,78	0,93
Kato-shi	2.870	Kyocera	255	3,13	1,09
Tsuga-ike	2.449	Kyocera	270	2,48	1,01
Sohara-ike	2.398	Mitsubishi	270	2,48	1,03
Sakasama-ike	2.313	Kyocera	255	2,61	1,13
Sakurakami-ike	1.992	Yingli	255	2,49	1,25
Hirono shin-ike	1.751	Sharp	250	1,92	1,1
Funatsu osawa	1.485	Yingli	250	1,69	1,14
Kawarayama-ike	1.428	Sharp	250	1,59	1,11
Kobe-ike	1.212	Yingli	255	1,29	1,06
Gono-ike	1.203	Yingli	255	1,28	1,06
Okegawa	1.180	Ja Solar	260	1,16	0,98
Hanamidai	1.153	Kyocera	255	1,26	1,09
Hirai-ike	1.125	Trina	250	1,26	1,12
Yasugi	1.098	Kyocera	245	1,25	1,14
Naga-ike nishi	1.078	Sharp	250	1,19	1,1
Fuku-ike	1.076	Mitsubishi	260	1,11	1,03
Sawa-ike	1.008	Trina	250	1,14	1,13

Los paneles que se estudian se escogen por tres razones, la primera razón es que en algunos lugares se necesita generar gran cantidad de energía en poca superficie, por lo que se escoge el panel que usa menos superficie por MW. Esto se aplica por ejemplo en lugares donde la superficie de agua es pequeña y se tiene alta demanda energética, por lo que el espacio se convierte en una restricción.

La segunda razón es que, en algunos lugares, se torna más importante la disminución de la evaporación por lo que no se necesita una gran eficiencia en la generación de energía, y no es tan solo una decisión de costos, es decir no es comparar cuánto cuesta el agua con cuánto cuesta la energía, debido a que en la minería del cobre se llega a parar la producción por falta de agua. Es por eso que se considera el panel que usa más superficie por MW, en este caso si se tiene que generar una cantidad de energía dada, entonces se debe ocupar una mayor superficie que en la opción anterior, lo que conlleva reducir aún más la evaporación.

La tercera razón es considerar la opción sin flotadores, y eso es usar los PV flotantes directamente sobre el agua como los paneles Power Film Inc [8], esto debido a las ventajas de esta tecnología y las desventajas de colocar los PV sobre flotadores presentada en la Tabla 4.6.

Lo anterior da como resultado que los tipos de panel a utilizar serán el de marca Ja Solar de 285 W<sub>p</sub> por tener una eficiencia más alta, Yingli de 255 W<sub>p</sub> por ser la que tiene menor eficiencia y notar además que esta marca de panel se encuentra en la planta más grande de esta empresa y también es uno de los más utilizados junto con Kyocera

A partir de la ficha técnica del panel Ja Solar 285 W<sub>p</sub>, el modulo con mayor eficiencia es el JAM6(L) 60-295/PR. El cual tiene una eficiencia de 18,04% y una potencia peak de 295 W<sub>p</sub>. Por otro lado está la ficha técnica del panel Yingli 255 W<sub>p</sub>, el panel menos eficiente, usando el mismo tamaño de modulo, es el YL230P-29b el cual tiene una eficiencia de 14,1% y una potencia peak de 230 W<sub>p</sub>. En conversaciones con el encargado de traer paneles Yingli a Chile informa que están descontinuados los de potencia tan baja y

solo se están fabricando paneles de 260 W<sub>p</sub> hacia arriba. En adelante se trata estos paneles como Yingli y Ja Solar.

El tercer panel escogido es diseñado especialmente para el agua, hecho por Power Film Inc. El cual fue laminado con etileno tetrafluoroetileno (ETFE) y el EVA solo fue ocupado para mejorar la impermeabilidad del panel. La caja de conexiones, los cables y las uniones fueron selladas con poliuretano (PU) y además son encerradas en un flotador de poliestireno. En adelante este panel será llamado panel Film.

#### 4.2.1 Paneles fotovoltaicos flotantes con seguimiento solar

Existen PV flotantes que incluyen seguimiento, pese a que sean solo unas pocas vale la pena mencionarlas debido al tipo de tecnologías que usan, la primera y la más grande construida de 465 kW<sub>p</sub>, ya se mencionó anteriormente y se muestra en la Figura 4.6, el mecanismo de giro se encuentra en el centro de la plataforma, lo que provoca que toda la planta gire en torno al eje central.

Otro ejemplo de seguimiento, a través del giro de la planta mediante un eje central, es el proyecto Petra Winery de 200 kW en Italia desarrollado por la compañía Terra Moretti Holding en conjunto con SCINTEC, en el cual la superficie flotante está hecha gran parte de puntales metálicos, con solo flotadores por debajo de esta. Además de tener seguimiento los paneles tienen una inclinación de 40°.

Un tercer proyecto realizado por la misma compañía anterior, en el lago Colignola de Italia, se realizó un prototipo de 30 kW<sub>p</sub>, con el mismo principio de rotación que los anteriores, solo que los paneles están contruidos con concentración solar mediante espejos puestos en un ángulo de 60° y -60° como se muestra en la Figura 4.9.



Figura 4.9 Planta piloto con concentración fotovoltaica y seguimiento solar. Fuente: SCINTEC.

Los sistemas de seguimiento solar permiten obtener una mayor radiación solar sobre el panel, mediante la inclinación del módulo manteniendo a este perpendicular con los rayos solares, por lo tanto, la generación de energía es mayor por unidad de superficie que los sistemas fijos. Existen dos tipos de seguimiento: el de uno y dos ejes.

Los sistemas de seguimiento en tierra tienen algunas limitaciones, como por ejemplo el número de PV que puede mover un solo dispositivo (bajo 3kW), pese a esto es conveniente algunas veces incluir un sistema de seguimiento, el cual debe ser analizado económicamente, ya que la inversión inicial y la mantención ven aumentadas su costo, pero se genera mayor energía, [9].

Por otra parte, está el factor técnico, tener mayor grado de libertad implica tener mayor cantidad de fallas, donde algunas veces sucede por la influencia del polvo, donde en los depósitos de relave abunda

debido a que gran parte de estos relaves es roca molida. Además 5% de las fallas que se producen en las plantas fotovoltaicas son producto del seguimiento, ocupando el quinto lugar. El primer lugar con un 49% es parte de las fallas en el centro de transformación [10].

En las plantas flotantes el peso de la estructura es traspasado a los flotadores, los cuales mediante el empuje son mantenidos sobre el agua, es por esto, que el peso de todo lo que este sobre los flotadores no es considerado como una dificultad a la hora de poner en movimiento este sistema. Solo se debe incluir un dispositivo capaz de mover la masa total de la estructura, sin considerar la fuerza de la gravedad. Lo que disminuye el riesgo de fallas en el sistema y aumenta la eficiencia.

En este estudio se analizan dos prototipos que tienen integrado sistema de seguimiento distinto, el primero en analizar se muestra en la Figura 4.10, constan de paneles inclinados con seguimiento en el eje vertical (VSAT). Es su base rotatoria la que permite el giro en torno al centro de esta. Este sistema es modular y se compone de al menos 4 octágonos y un centro cuadrado donde está el centro de operación.



*Figura 4.10 Sistema de seguimiento 'base rotatoria'. Fuente: [11]*

En la imagen izquierda de la Figura 4.11 se muestra un acercamiento de la imagen derecha, donde se puede ver la esquina superior derecha como una sección de todo el círculo, a partir de ahí es impulsado el giro del sistema con un motor, instalado en la zona fija de la estructura.

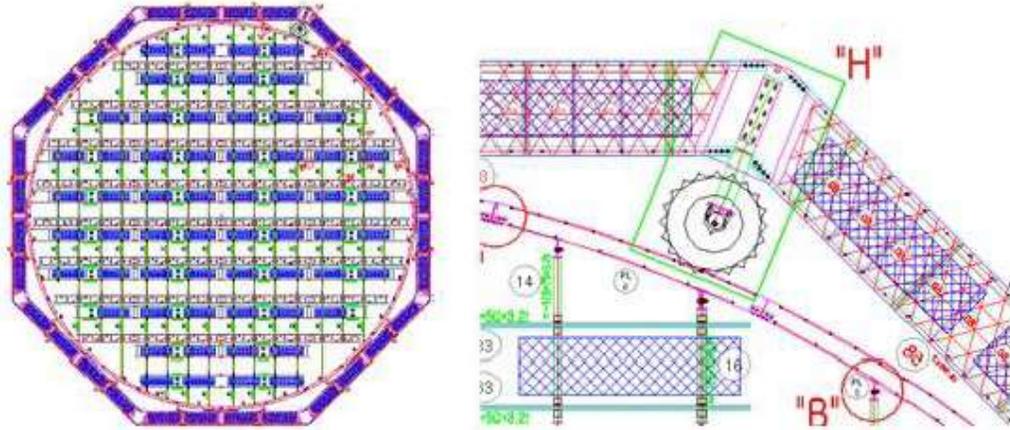


Figura 4.11 Sistema de rotación de la base. Fuente: [9]

La estructura está hecha de plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP), mientras que los flotadores están hechos de polietileno (PE), esto debido a que el GFRP tiene mejor comportamiento estructural que el PE, sin embargo, este último tiene menor densidad y la estructura se pretende soportar por flotabilidad, así es como se combinan estos dos materiales para crear la estructura flotante. [12]

Esta estructura pese a que la construyen con GFRP se puede construir a partir de tuberías y codos de PVC o cualquier polímero que esté disponible en el mercado, gracias a esto la posibilidad de construir esta estructura es mayor y es más fácil considerando que se pueden utilizar otros materiales los cuales además se pueden armar en terreno. Por otro lado, al ser una estructura modular no tendría problemas de irse expandiendo, y sería aún mejor para tener una mejor movilidad en el parque flotante, mejor estabilidad y mejor eficiencia si se usan inversores mayores.

La segunda estructura con seguimiento solar es de dos ejes, es la de Sun-Spotter mostrada en la Figura 4.12, en el fondo se tienen 4 esferas con agua, conectadas entre sí. Este sistema se inclina a través del movimiento del agua que contienen estas esferas, por ejemplo, en la imagen derecha se muestra todo el fluido en la boya derecha, el peso aparente de esta aumenta y mientras que en la otra disminuye, lo cual provoca la inclinación deseada en la boya naranja de  $36^\circ$ .

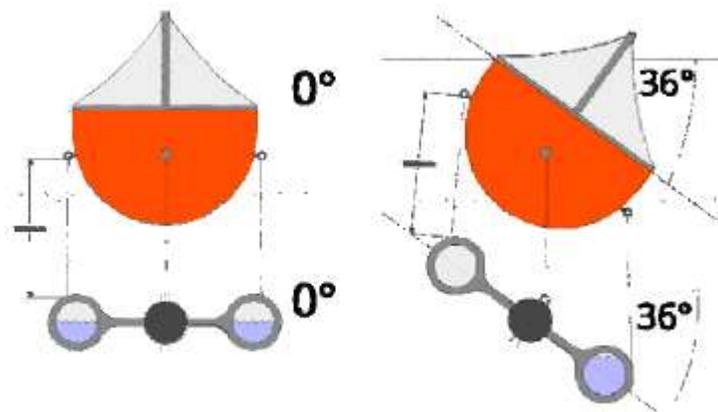
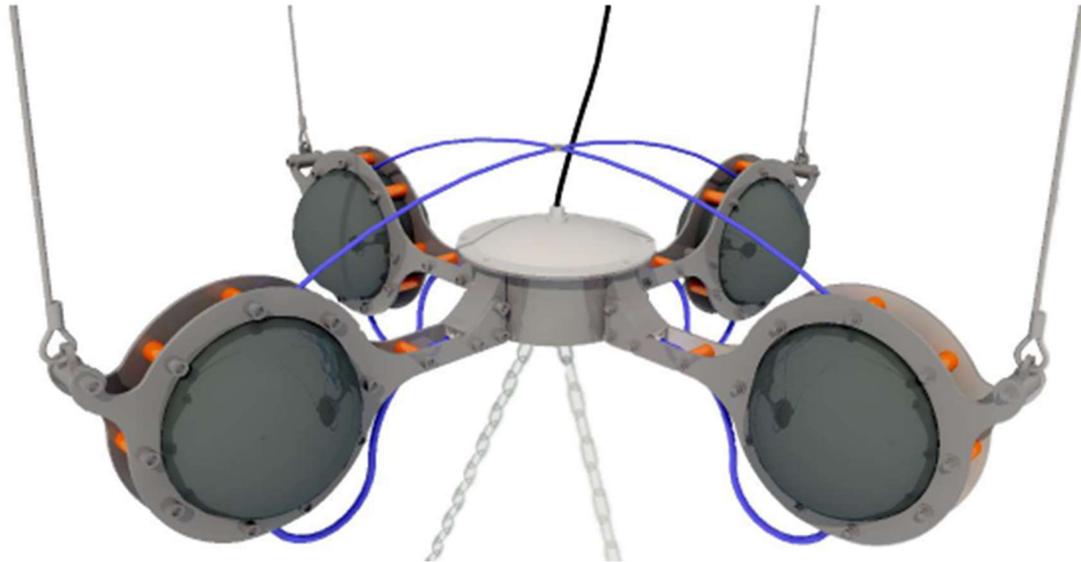


Figura 4.12 Sistema de seguimiento 'Sun-Spotter'. Fuente: [13]

En el centro de las cuatro esferas, representado como un círculo negro están las bombas encargadas de distribuir el agua de una pelota a otra, se puede ver las conexiones y además el sistema de las 4 esferas

en la Figura 4.13, es en la caja circular donde se encuentran las bombas. Este sistema se mantiene encadenado con el suelo. Para transferir el movimiento de las esferas a la boya se tienen cables de tensión entre las esferas y la boya.



*Figura 4.13 Diseño de las 4 esferas, sistema de seguimiento. Fuente: [14]*

En la parte de más arriba de la boya se encuentra una celda monocristalina, la cual recibe la radiación solar a través de espejos ubicados en la boya. Funciona a través de concentración fotovoltaica, para estos casos funciona mejor las celdas más eficientes posibles, como las Three-junction, si el prototipo fabricado se hubiese hecho con este tipo de celdas el Payback sería tres veces menor.

De este tipo de seguimiento solo existen prototipos, la empresa pretende bajar el precio de fabricación para tener Payback aún más bajos, también se pretende generar un prototipo escalado en el doble de tamaño para que pueda generar más energía con un menor costo, por otro lado, se cambiaría el tipo de celda por una más eficiente y se incluiría refrigeración en esta celda, ya que esta celda no se encuentra tan cercana al agua como para ser enfriada por esta.

Para construir esta estructura se debe manufacturar casi todos sus elementos, por ejemplo, las cuatro esferas, el soporte de ellas, la caja donde están las bombas, la boya y el soporte del panel, considerar además que para ir expandiendo la planta para cubrir mayor superficie y para generar más energía entonces se necesitaría más de estos dispositivos, los cuales tiene el sistema de seguimiento de manera individual, lo que provoca mayor cantidad de fallas y más difíciles de reparar.

En la Tabla 4.8 se muestra el resumen de las dos plantas de seguimiento solar, de donde se puede extraer que la planta con base rotatoria tiene la mayor planta con seguimiento solar en el mundo y que además su posibilidad de construcción y expansión son mayores que las de Sun-Spotter, debido a que la primera se puede construir a partir de elementos encontrados en el mercado y no se tienen que manufacturar tantos productos.

Tabla 4.8 Resumen de los tipos de seguimiento y sus características principales. Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Tipo de seguimiento	Mayor planta [W <sub>p</sub> ]	Mejor zona de aplicación	Posibilidad de construcción	Posibilidad de expansión	Generación eléctrica
Base rotatoria	VSAT	500.000	Latitudes altas	Alta	Alta	Alta
Sun-Spotter	2-ejes	410	Latitudes medias	Media	Baja	Alta

A continuación, se hace una comparación de cuanto energía se podría generar anual en los tres depósitos escogidos anteriormente, pero para eso primero se debe encontrar el ángulo óptimo para los paneles inclinados con seguimiento VSAT, Se usa el explorador solar del ministerio de energía, el cual supone una capacidad instalada de 1kW, con un coeficiente de temperatura del panel de  $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$ , además considera pérdidas por el inversor de 4%, y el factor de pérdidas del sistema fotovoltaico es de 14%.

Para el depósito Laguna Seca se tienen los datos mostrados en la Tabla 4.9 el cual muestra que el ángulo óptimo de inclinación de los paneles para el seguimiento VSAT está entre  $51^{\circ}$  y  $53^{\circ}$ , obteniendo un factor de planta 35,6% y un total de 3.116 kWh al año.

Tabla 4.9 Ángulo óptimo para seguimiento VSAT en depósito Laguna Seca. Fuente: Elaboración propia.

Angulo	30°	40°	45°	50°	51°	52°	53°	54°	55°	60°
Energía anual kWh	2.937	3.098	3.099	3.115	3.116	3.116	3.116	3.114	3.112	3.090
Factor de planta %	33,5	35,4	35,4	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6	35,5	35,3

Para el depósito El Mauro se tienen los datos mostrados en la Tabla 4.10 el cual muestra que el ángulo óptimo de inclinación de los paneles para el seguimiento VSAT está entre  $50^{\circ}$  y  $52^{\circ}$ , obteniendo un factor de planta 27,6% y un total de 2.420 kWh al año.

Tabla 4.10 Ángulo óptimo para seguimiento VSAT en depósito El Mauro. Fuente: Elaboración propia.

Angulo	30°	40°	45°	49°	50°	51°	52°	53°	55°	60°
Energía anual kWh	2.294	2.385	2.409	2.419	2.420	2.420	2.420	2.419	2.415	2.397
Factor de planta %	26,2	27,2	27,5	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,4

Para el depósito Ovejería se tienen los datos mostrados en la Tabla 4.11 el cual muestra que el ángulo óptimo de inclinación de los paneles para el seguimiento VSAT está entre  $51^{\circ}$  y  $53^{\circ}$ , obteniendo un factor de planta 26,1% y un total de 2.282 kWh al año.

Tabla 4.11 Ángulo óptimo para seguimiento VSAT en depósito Ovejería. Fuente: Elaboración propia.

Angulo	30°	40°	45°	50°	51°	52°	53°	54°	55°	60°
Energía anual kWh	2.156	2.245	2.270	2.282	2.282	2.282	2.282	2.281	2.280	2.264
Factor de planta %	24,6	25,6	25,9	26,0	26,1	26,1	26,1	26,0	26,0	25,8

En la Tabla 4.12 se aprecia como el seguimiento de dos ejes logra mayor generación de energía anual, y consecuentemente un mayor factor de planta, pese a eso los factores de planta entre ambos seguimientos no difieren en más de 1,7%, no así con los paneles fijos que tienen una diferencia de hasta 11,3% con el seguimiento de Sun-Spotter y de 9,6% con el seguimiento de Base rotatoria.

Tabla 4.12 Energía anual y factor de planta. Fuente: Elaboración propia.

Deposito	Fijo inclinado		Base rotatoria		Sun-Spotter	
	Energía anual kWh	Factor de planta	Energía anual kWh	Factor de planta	Energía anual kWh	Factor de planta
Laguna Seca	2.275	26%	3.116	35,6%	3.270	37,3%
El Mauro	1.851	21,1%	2.420	27,6%	2.512	28,7%
Ovejería	1.738	19,8%	2.282	26,1%	2.369	27%

Luego pese a que el seguimiento solar se estudia por el solo hecho de poder generar aún más energía con menos superficie, y que además el sistema Sun-Spotter genera más energía eléctrica que el de base rotatoria, ambos generan más energía que un sistema fijo. Por esto y por lo mostrado en la Tabla 4.8 el sistema de seguimiento escogido para estudiar es el de base rotatoria.

El seguimiento solo se evalúa para un depósito donde este signifique un porcentaje mayor de generación de energía en comparación con tener un sistema fijo, en la Tabla 4.13 se logra obtener el beneficio en energía extra y en porcentaje para cada uno de los depósitos, mostrándose que el mayor beneficio se da en el depósito de Laguna Seca, así que la evaluación económica solo se hará en ese depósito.

Tabla 4.13 Beneficio energético por tener seguimiento por depósito. Fuente: Elaboración propia.

Deposito	Energía anual Fijo	Energía anual Seguimiento	Energía anual extra	Porcentaje extra
Laguna Seca	2.275 kWh	3.116 kWh	841 kWh	37,0%
El Mauro	1.851 kWh	2.420 kWh	569 kWh	30,7%
Ovejería	1.738 kWh	2.282 kWh	544 kWh	31,3%

### 4.3 Elementos de un parque fotovoltaico flotante.

Un parque fotovoltaico se divide en arreglos de paneles, el cual consta de filas de paneles conectados en serie y estos conectados en paralelo con otras filas, en general este arreglo cuenta con un inversor por lo que la conexión a la red eléctrica puede ser independiente de otro arreglo en la misma planta, estos arreglos tienen paneles fotovoltaicos, cajas de conexiones, inversores, cables, protecciones eléctricas y un medidor bidireccional el cual es el encargado de registrar cuanta energía se compra y cuanta se vende.

El parque al ser flotante junto con todo lo anterior debe contar con los flotadores, que el similar en parques PV puestos en tierra es la estructura de anclaje y sus cimientos, para el caso de paneles fijos se coloca en los flotadores solo los paneles, en cambio que para paneles con seguimiento se tiene que integrar todo el sistema dentro del agua, por la movilidad de los cables.

Se tiene que saber la disposición que tendrá el arreglo de paneles para saber cuántos de elementos se usarán, para eso se procede a escoger el inversor, que en este caso se elige el que tenga mayor capacidad ya que permite tener menos inversores por cantidad de paneles lo que abarata costos y disminuyen las pérdidas por eficiencias, por otra parte que la salida de corriente este dentro de la categoría de baja tensión, esto último, quiere decir que entregue un voltaje menor a 1000V, esto sirve para poder conectarse a cualquier red eléctrica o subestación que sea como mínimo de baja tensión.

El inversor se cotiza dentro de las opciones de Tritec Intervento, y el resultado del análisis anterior es que el modelo de inversor SMA Sunny Tripower 60000TL-40 es el más conveniente, para este modelo de inversor existe una caja de conexiones de modelo SMA DC - Combiner Box para STP60000, la cual sirve para conectar todas las filas de paneles al inversor principal de manera más segura y ordenada.

Las características del inversor que nos interesan para calcular cuántos paneles pueden ser usados en serie o en paralelo son dadas a continuación en la Tabla 4.14, y en conjunto con la especificación técnica de los paneles tanto Yingli como Ja Solar en la Tabla 4.15.

Tabla 4.14 Características del inversor. Fuente: Elaboración propia a partir de información de SMA

Variables	Valor	Unidades
Max. generator power	90.000	Wp
Max. input voltage	1.000	V
MPP voltage range	570 a 800	V
Max. input current	110	A

Tabla 4.15 Características de los paneles utilizados. Fuente: Elaboración propia.

Datos	Yingli	Ja Solar	Unidades
Potencia peak	320	355	Wp
Imp	8,68	9,16	A
Voc	46	47,45	V

Con estos datos se obtiene un arreglo de 15 paneles en serie, con 10 filas de paneles en paralelo, esto tendrá asociado el inversor antes descrito, donde el voltaje y el amperaje máximo de la planta se describe en la Tabla 4.16, para ambos paneles.

Tabla 4.16 Datos de amperaje y voltaje de la planta. Fuente: Elaboración propia.

Datos por arreglo	Yingli	Ja Solar	Unidades
Imax	91,2	91,6	A
Vmax	690	711,75	V
Potencia peak	48.000	53.250	Wp

Subestimando la capacidad de generación de este arreglo con los paneles Film, y considerando 20 arreglos, surge un problema, que es la mantenibilidad, en el ambiente de depósitos de relaves, abunda mayor cantidad de polvo que en otras lagunas, este es acumulado sobre el panel, pero los paneles Film para ser limpiados deben ser retirado del agua o la otra opción es sumergirlo.

La primera opción es inviable, ya que una planta de 20 arreglos con 10 filas por arreglo significaría retirar del agua 200 filas de paneles para poder hacer la mantención, la opción de sumergirlo también tiene dificultades para plantas de gran tamaño, ya que se requiere pasar con una balsa entre paneles para poder limpiarlo pero esto es difícil entre filas por el set de cables existente, la otra opción es hacer pasillos para el tránsito de los operarios, pero estos cuando no tengan peatones estarán por sobre el panel lo que provocaría pérdidas por sombreado, aunque esta última opción se podría corregir con distancia entre el pasillo y el panel, el problema es que el pasillo no puede quedar muy retirado del panel, ya que estos paneles miden de largo 3,45 metros, lo cual limita el alcance del operario.

Este tipo de planta con paneles directamente sobre el agua es descartada para el análisis económico, ya que no es factible técnicamente un tamaño de planta como la que se intenta evaluar en este estudio, pese a eso, se hace la acotación que se podrían hacer plantas de gran tamaño con paneles directamente sobre el agua, pero se recomienda que se cuente con sistema de auto limpieza, ya sea por el movimiento del agua sobre el panel o por algún sistema externo no necesite la presencia al operario cercano al panel. Además para sistemas menores, como para ser conectados con la ley Netmetering sería bastante conveniente, siempre y cuando estos paneles puedan ser importados al país.

#### 4.4 Flotadores para relaves

El proceso de concentración de cobre por flotación produce relave en solución acuosa con PH entre 8 y 11 esta solución al llegar a los depósitos, toda la materia sólida comienza a decantar, provocándose una laguna encima del relave, es en esta laguna donde se debe colocar el parque fotovoltaico flotante.

Los cables asociados a este parque tendrán que ser dirigidos a través del agua para luego ser transportados por tierra, por otro lado, la mantención de la planta se deberá hacer sobre la misma, por lo que tendrá que tener un espacio para el tránsito de las personas. Tanto la sala de control, como la sala de potencia con equipos como inversores, controladores de carga y transformadores serán puestas sobre tierra.

Los materiales a seleccionar deben tener un comportamiento adecuado con el agua y sometidos a un PH básico, debe tener baja densidad para permitir la flotación sin tener que ocupar grandes espacios, y debe tener una constructibilidad adecuada.

La selección de materiales tendrá un primer filtro, donde se define a grandes rasgos de qué tipo de material será, metálico, cerámico o polímero. Los materiales cerámicos tienen en general una densidad mayor que el agua, por lo que debería contar con flotadores externos para la aplicación, son difíciles de conformar, y de las plantas analizadas ninguna es construida con materiales cerámicos, por lo que los materiales cerámicos son descartados para formar la estructura.

Los materiales metálicos son utilizados en aplicaciones de flotabilidad incluso algunos PV flotantes son construidos sobre superficies metálicas, ofrecen una alta resistencia a la radiación solar, tiene facilidad para ser conformados y para armar estructuras, se tiene gran disponibilidad con diferentes perfiles, la gran desventaja es la alta densidad de estos materiales, lo que implica tener siempre asociado flotadores a la estructura.

El acero es bastante usado en construcciones para aumentar la resistencia de la estructura, pero su alta densidad implicaría en este caso aumentar el tamaño de los flotadores y de la estructura, por consiguiente aumentar los costos, además, este material presenta corrosión en contacto con el agua lo que disminuye su durabilidad.

Por otro lado, el aluminio no presenta graves problemas de corrosión comparado con el acero, pero también ve reducida su durabilidad producto del agua, tiene menor densidad en comparación con muchos tipos de aceros, y tiene buena constructibilidad al tener bajo peso. El problema de este material es su conexión a través de soldadura, por lo que las uniones se hacen generalmente con elementos externos.

Por último están los polímeros, los cuales en general tienen baja densidad, son fáciles de conformar, y más de la mitad de las plantas analizadas están hechas por un polímero llamado polietileno de alta densidad (HDPE), por otra parte, existen estructuras flotantes para relaves de polipropileno (PP), HDPE y PVC en formato de tuberías, todos estos están disponibles en el mercado como tuberías y con sus accesorios asociados.

Los plásticos reforzados con fibras son bastante usados en la industria náutica, y además el prototipo de Sun-Spotter usa este material para flotar, por lo que entra entre los materiales disponibles para usar, cabe notar que la disponibilidad de este producto es más acotada, aun así, se puede manufacturar. Con respecto a la constructibilidad de este material es un tanto más baja que la de los polímeros, debido a que este material presenta fracturas con los golpes lo que dificulta su manipulación.

Los polímeros más usados en la industria presentan fotodegradación por lo que se le añaden aditivos para evitar la descomposición del material, en general provocan que el material cambie de color a negro. La

degradación también puede ser hidrolítica, esta se manifiesta en hinchamientos o en filtraciones de agua, este tipo de degradación es muy bien evitado por las industrias manufactureras.

Por lo tanto, los flotadores se pueden hacer de acero, aluminio, polímeros, y de plásticos reforzados con fibras (GFRP). A través de la Tabla 4.17 se escogerá con que material se diseñaran los flotadores. Los flotadores también pueden cumplir de diferentes formas el objetivo de producir energía y disminuir la evaporación. Por ejemplo, en el que diseño con seguimiento se estará enfocado a producir más energía, por lo tanto, contarán con los paneles más eficientes, que significa un mayor costo y además tendrán la inclinación necesaria que conlleva a una estructura más cara.

El otro tipo de flotador que se diseñará es para usarlos con paneles fijos, este tipo de flotador estará pensado para que sea buena constructibilidad y una alta disponibilidad en el mercado, para que no sea complicado fabricar este.

Se mide como constructibilidad como la facilidad que tienen los materiales, para ser trabajados en terreno, para crear estructuras y para ser manipulados sin ayuda de maquinaria, también se define como resistencia como la capacidad de soportar el ambiente del relave, es decir alta cantidad de polvo y agua con PH básico. La disponibilidad se refiere a la capacidad de encontrar el material en el mercado con facilidad y en diversos formatos. Estas tres características son evaluadas con alta, media y baja, para cada material en la Tabla 4.17.

*Tabla 4.17 Resumen de las características de los materiales a seleccionar. Fuente: Elaboración propia.*

Material	Constructibilidad	Resistencia	Disponibilidad	Densidad
Acero	Media	Media	Alta	Alta
Aluminio	Media	Media	Alta	Media
GFRP	Media	Alta	Media	Baja
HDPE	Alta	Alta	Alta	Baja
PP	Alta	Alta	Alta	Baja
PVC	Alta	Alta	Alta	Baja

Según la tabla anterior se recomienda usar cualquier tipo de polímeros, si se escoge uno u otro será simplemente por la disponibilidad en las dimensiones necesarias para la construcción del flotador o por factores económicos. Cabe destacar que el soporte de la planta con seguimiento es diferente a una planta que no tiene seguimiento, en todos los casos se considera la opción de combinar materiales para un correcto diseño de la estructura.

Se comparan los precios de los tres materiales en cotizaciones entregadas por la empresa Vinilit, en la Tabla 4.18, se puede notar que para cualquier diámetro el PVC es la tubería más barata, por otra parte, el PP resulta ser la tubería con el mayor precio y menor disponibilidad de diámetros, con respecto a esto último, la disponibilidad de HDPE en diámetros es mayor que la del PVC.

*Tabla 4.18 Precios de tuberías para distintos diámetros Fuente: : Elaboración propia a partir de información de Vinilit*

Diámetros	PP	HDPE	PVC
0,16	61.141	8.710	-
0,18	-	10.720	4.929
0,2	156.400	12.730	6.060
0,25	246.100	20.100	10.937
0,315	-	31.490	17.464

Por lo tanto, el material a utilizar es el PVC con la ayuda de materiales anexos para ayudar con la sujeción de paneles, ya sean los antes mencionados o también puede ser algún material que sea usado en la industria náutica.

#### 4.5 Diseño de la estructura

El flotador está conformado por 4 tuberías paralelas, de las cuales dos están encargadas de sujetar un panel y las otras dos sirven de pasillo para personas, se puede notar en la Figura 4.14, los paneles se sujetarán en rieles de aluminio con unas grapas comerciales diseñadas para la sujeción de paneles, estos rieles descansarán en unas placas de maderas, que además cumple la función de mantener la distancia entre tuberías, y estas placas son sujetadas a través de abrazaderas.

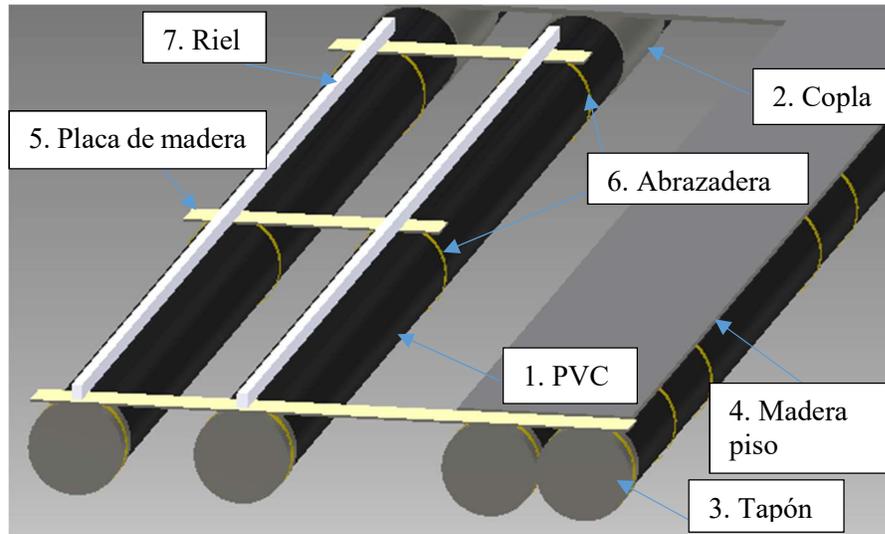


Figura 4.14 Diseño de la estructura flotante. Fuente: Elaboración propia.

Además, para mejorar el tránsito entre filas de paneles se hacen pasillos intermedios, cabe destacar que el pasillo está constituido por un terciado de pino radiata antideslizante, hecho con adhesivo fenólico especial para ambientes húmedos. El pasillo es aquel que se muestra con color gris entre los paneles en la Figura 4.15. los paneles fotovoltaicos se representan a través de una figura entregada por Ja Solar en su especificación técnica.

Para paneles puestos con inclinación se deben colocar además de lo anterior estructuras de inclinación para la parte alta y para la parte baja del panel como se muestra en la Figura 4.16, luego el riel va sobre esta estructura, todos lo demás es análogo a la descripción anterior.

A partir de la enumeración de elementos se pueden estimar cuántos de estos elementos se necesitan por panel, esto con el fin de calcular el costo de esta inversión y el peso de la estructura. Los resultados se muestran en la Tabla 4.19, en la columna de unidades por panel.

Se debe estimar el tamaño de las tuberías para costear la estructura, se requiere saber un peso estimado de los paneles y de la estructura, para eso se toma un peso promedio de los paneles Yingli y Ja Solar, los cuales pesan 19,2 kg y 18,2 kg respectivamente. Por lo tanto, se usa como peso de los paneles 18,7 kg. Suponiendo que al lado de cada panel pueden estar dos personas paradas, estimándose el peso de la persona de 70kg. En conjunto el peso de otros componentes como los que se muestran en la Tabla 4.19 y todo esto sumado a un margen de seguridad de 20%.

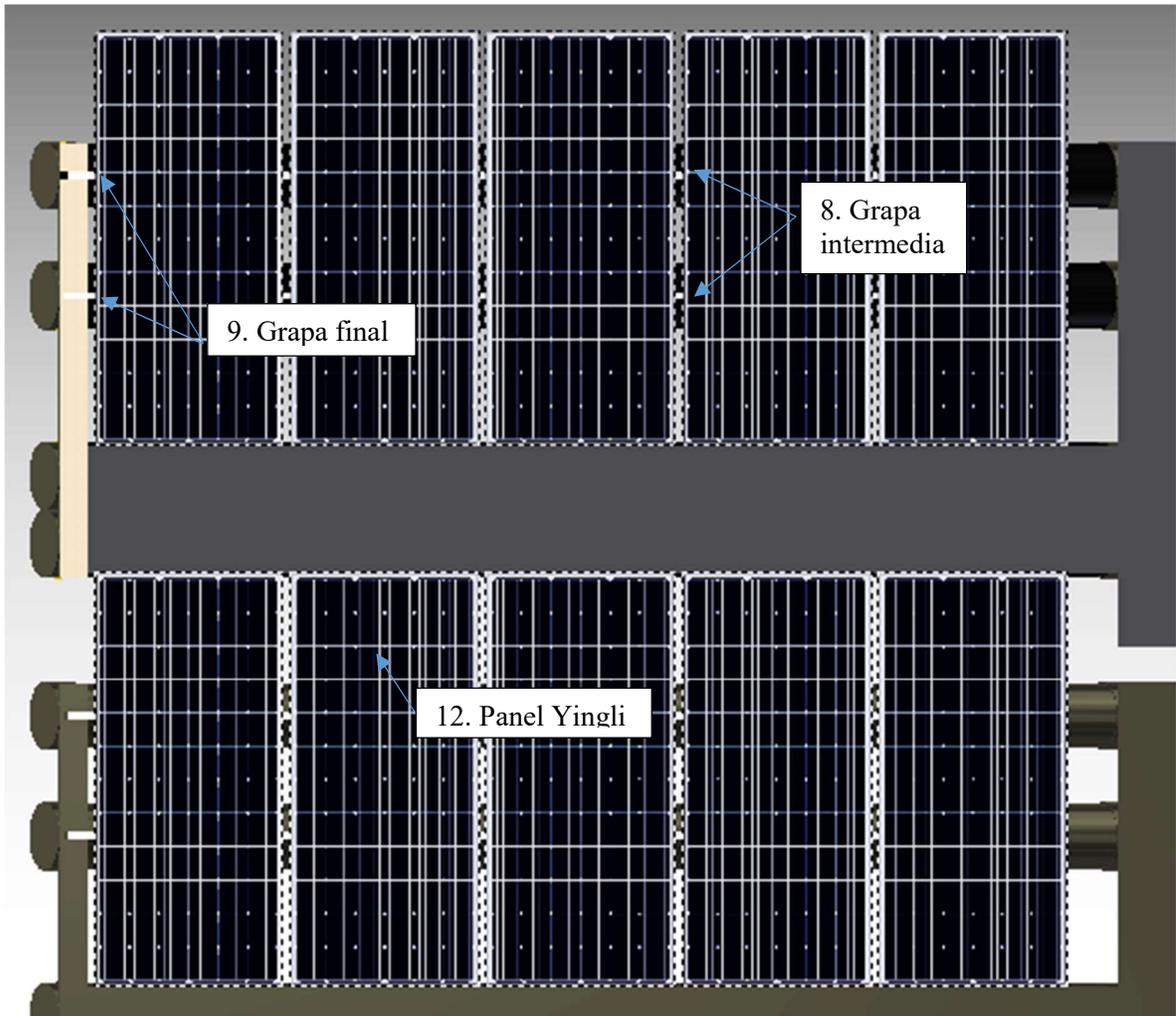


Figura 4.15 Diseño de dos filas de paneles en tuberías de 6 metros. Fuente: Elaboración propia.

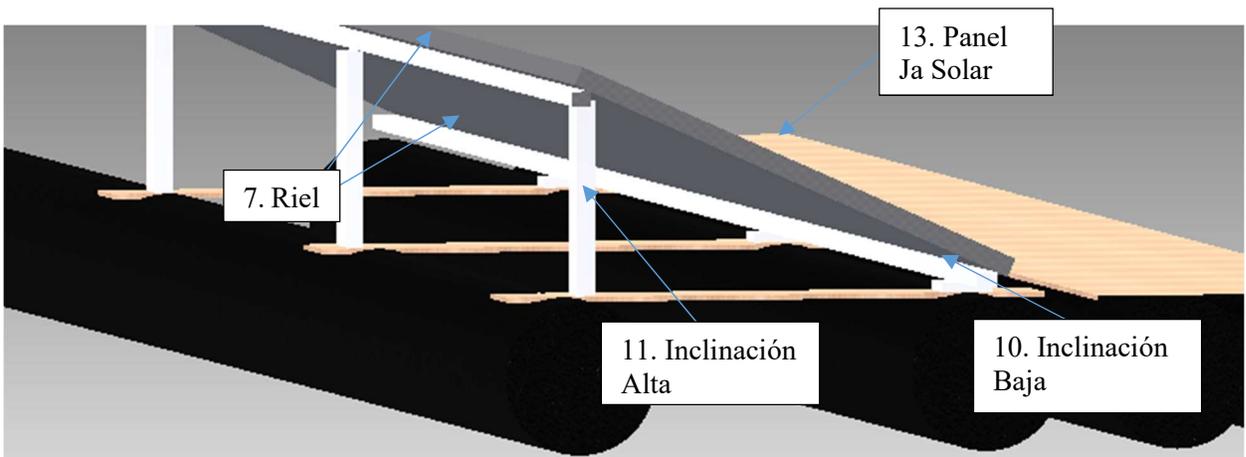


Figura 4.16 Elementos de inclinación para paneles. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.19 Otros elementos que añaden peso a la estructura. Fuente: Elaboración propia.

Otros elementos	Peso /unid	unidades / panel	Peso/panel
2. Copla	9,4**	0,53	5,0
3. Tapón	9,4**	0,80	7,5
4. Madera piso	27	0,6	16,2
5. Placa de madera	16,38	0,13	2,18
6. Abrazadera	0,1*	4	0,4
7. Riel	1*	0,4	0,4
8. Grapa intermedia	0,1*	1,6	0,16
9. Grapa final	0,1*	0,8	0,08
10. Inclinación baja	1*	0,6	0,6
11. Inclinación alta	2*	0,6	1,2
Otros	0,5*	0,8	0,4
Peso total			34,15

\* Aproximación a partir del material y tamaño

\*\* Aproximación a partir del peso de una tubería del mismo diámetro

Continuando con esta estimación del peso, se suma el de las tuberías, lo cual fue calculado a partir de su densidad lineal dada por el fabricante, los datos de las tuberías se pueden encontrar en la Tabla 4.20. con los cuales se calculan el empuje generado por la disposición de tuberías mostrada.

Tabla 4.20 Características físicas de la tubería. Fuente: Vinilit

Diámetro exterior [m]	Espesor [m]	Densidad lineal [kg/m]
0,18	0,0042	3,1
0,2	0,0046	3,8
0,25	0,0056	5,9
0,315	0,0071	9,4
0,355	0,0079	12,0
0,4	0,0089	15,2

El cálculo de empuje y peso por panel es mostrado en la Tabla 4.21, donde el empuje es calculado a través del principio de Arquímedes, y el peso por panel como se mencionó anteriormente, según los resultados las tuberías que soportan el peso sin hundirse tienen que tener como mínimo un diámetro de 0,315 metros, cabe destacar que se hace el supuesto de dos personas por panel, lo cual es considerablemente alto una vez construida la planta.

Tabla 4.21 Diámetros disponibles para fabricar la estructura. Fuente: Elaboración propia.

Diámetro [m]	Empuje [N]	Peso [N]	¿Soporta?
0,18	897,5	2.414,2	No
0,2	1.109,6	2.447,8	No
0,25	1.738,1	2.544,8	No
0,315	2.757,8	2.710,0	Sí
0,355	3.506,9	2.831,0	Sí
0,4	4.452,4	2.984,1	Sí

Si se hace el cálculo considerando dos personas por cada cinco paneles, todo esto en una tubería de seis metros, entonces se puede ocupar tuberías de menor diámetro, esto se ve reflejado en los resultados

mostrados en la Tabla 4.22, que indica que se pueden ocupar tuberías de hasta 0,2 metros de diámetro. Por lo tanto, la opción que se usa es la de diámetro 200 mm llamada de ahora en adelante PVC 200. Por otra parte, cabe destacar que esta opción soporta 1000 N adicionales a lo necesario, es decir aproximadamente 100 kilos más.

Tabla 4.22 Diámetros disponibles con menor cantidad de personas por panel. Fuente: Elaboración propia.

Diámetro [m]	Empuje [N]	Peso [N]	¿Soporta?
0,18	5.439,5	5.485,6	No
0,2	6.724,9	5.653,4	Sí
0,25	10.534,1	6.138,3	Sí
0,315	16.714,1	6.964,2	Sí
0,355	21.253,9	7.569,5	Sí
0,4	26.984,1	8.335,1	Sí

La distancia entre paneles se define según el ancho de la tabla escogida para el suelo, la cual tiene dimensiones de 1,22 m x 2,44 m con 18 mm de espesor, se usa la mitad de la tabla para poder hacer un pasillo, con eso queda de 0,61 m de ancho y 2,44 m de largo, para paneles sin inclinación la separación entre cada panel solo es el ancho del pasillo, considerar que estos paneles son colocados de manera que ocupen menos espacio en tuberías, entonces se coloca con el borde largo de manera perpendicular a los tubos, como se muestra a la derecha de la Figura 4.17. Al contrario de los paneles con inclinación que se colocan de manera longitudinal a los tubos, esto ya que de esta forma el panel provoca menos largo de sombra, por lo que la distancia entre paneles es menor.

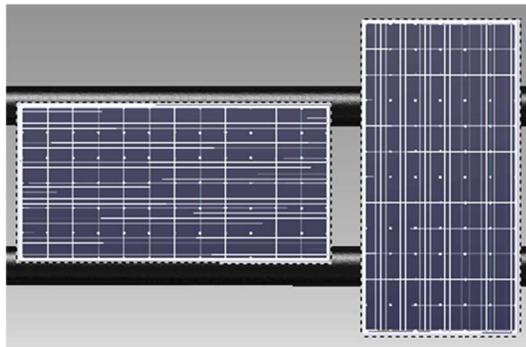


Figura 4.17 Paneles puestos longitudinal y perpendicular al tubo. Fuente: Elaboración propia.

Para paneles con inclinación se procede a calcular la distancia entre paneles con las formulas anteriormente descritas, pero para eso primero debemos saber la inclinación adecuada de los paneles, se usa el criterio de máxima energía durante el año para optimizar el ángulo, la herramienta usada es el explorador solar del ministerio de energía, la cual entrega los siguientes resultados.

Tabla 4.23 Inclinación de paneles para los distintos depósitos. Fuente: Elaboración propia.

Depósito	Latitud	Longitud	Inclinación	Azimet
Laguna Seca	-24,41	-69,12°	24	-1
El Mauro	-31,96	-71,03°	27	1
Ovejería	-33,04	-70,80°	28	1

Para el solsticio de invierno se obtiene una declinación de 23,4°, lo cual se ocupa para obtener la altura solar y con esto último se obtiene la distancia entre paneles para asegurar 4 horas de sol al panel. Primero se entregan los resultados de distancias para Ovejería en la Tabla 4.24, luego los resultados de El

Mauro en la Tabla 4.25 y por ultimo Laguna Seca en la Tabla 4.26, incluyendo la distancia entre paneles con seguimiento VSAT en la Tabla 4.27.

Tabla 4.24 Distancia entre paneles para el depósito Ovejería. Fuente: Elaboración propia.

Hora	AH	Altura solar	Distancia [m]
10:00	-30,0	26,7	0,93
10:30	-22,5	29,6	0,83
11:00	-15,0	31,7	0,76
11:30	-7,5	33,1	0,72
12:00	0,0	33,5	0,71
12:30	7,5	33,1	0,72
13:00	15,0	31,7	0,76
13:30	22,5	29,6	0,83
14:00	30,0	26,7	0,93

Tabla 4.25 Distancia entre paneles para el depósito El Mauro. Fuente: Elaboración propia.

Hora	AH	Altura solar	Distancia [m]
10:00	-30,0	27,6	0,87
10:30	-22,5	30,6	0,77
11:00	-15,0	32,8	0,71
11:30	-7,5	34,1	0,67
12:00	0,0	34,6	0,66
12:30	7,5	34,1	0,67
13:00	15,0	32,8	0,71
13:30	22,5	30,6	0,77
14:00	30,0	27,6	0,87

Tabla 4.26 Distancia entre paneles para el depósito Laguna Seca. Fuente: Elaboración propia.

Hora	AH	Altura solar	Distancia [m]
10:00	-30,0	34,0	0,60
10:30	-22,5	37,4	0,53
11:00	-15,0	40,0	0,49
11:30	-7,5	41,6	0,46
12:00	0,0	42,1	0,45
12:30	7,5	41,6	0,46
13:00	15,0	40,0	0,49
13:30	22,5	37,4	0,53
14:00	30,0	34,0	0,60

Tabla 4.27 Distancia entre paneles para el depósito Laguna Seca con seguimiento VSAT. Fuente: Elaboración propia.

Hora	AH	Altura solar	Distancia [m]
10:00	-30,0	34,0	1,17
10:30	-22,5	37,4	1,03
11:00	-15,0	40,0	0,94
11:30	-7,5	41,6	0,89
12:00	0,0	42,1	0,87
12:30	7,5	41,6	0,89
13:00	15,0	40,0	0,94
13:30	22,5	37,4	1,03
14:00	30,0	34,0	1,17

Se tiene que notar que en cada una de las tablas la distancia mínima entre paneles se da al mediodía, y por el contrario la mayor distancia se da en las horas lejanas al mediodía, considerar la distancia máxima entre paneles como la que sucede a las 10:00 horas, significa asegurar las 4 horas de sol, notar además que la distancia entre paneles para el depósito Laguna Seca es menor que la distancia del pasillo, por lo que basta con la distancia del pasillo para separar los paneles, esto es gracias a la baja inclinación que se requiere para los paneles en el norte. En la Tabla 4.28 se resumen las distancias entre paneles escogidas.

Tabla 4.28 Distancia de separación entre paneles con ángulo de inclinación. Fuente: Elaboración propia.

Depósito	Ovejería	El Mauro	Laguna Seca	Laguna Seca VSAT
Separación [m]	0,93	0,87	0,61	1,17

La disposición de 2 filas de paneles sin inclinación se muestra en la Figura 4.18 donde se quitaron algunos paneles para poder observar la estructura, en esta estructura se muestran 3 filas de un total de 10 filas que tiene un arreglo, cabe destacar que los pasillos se encuentran en la unión de cada tubería de 6 metros. Para mayor detalle de la disposición de las filas de paneles y del arreglo consultar el Anexo B en el plano 1 y 2.

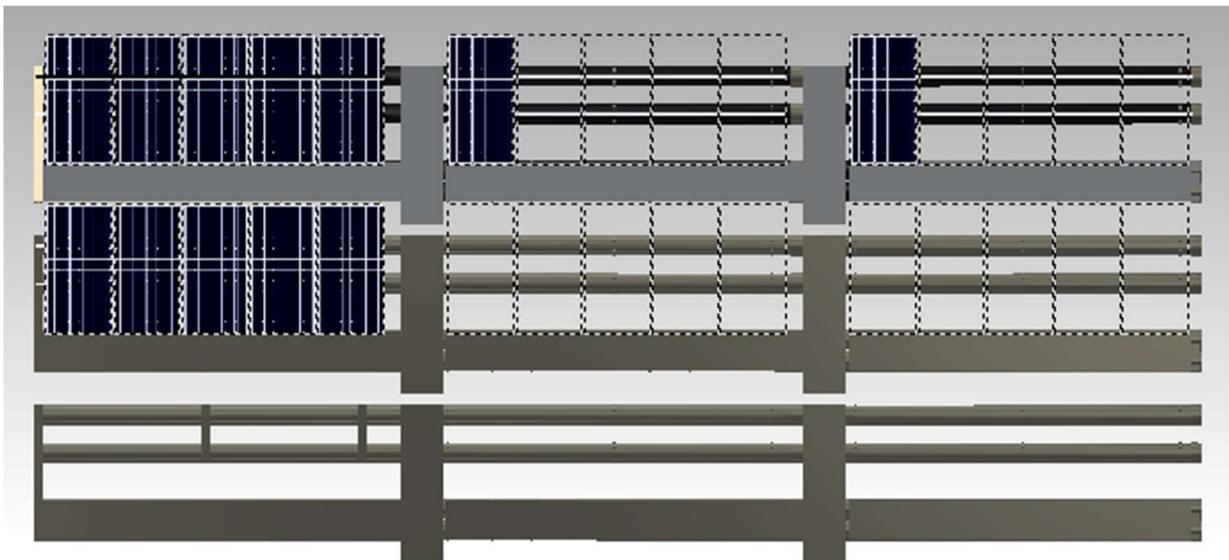


Figura 4.18 Tres filas de la estructura de un arreglo de paneles sin inclinación. Fuente: Elaboración propia.

Los paneles con inclinación usan una mayor extensión horizontalmente, es decir requieren un mayor número de tuberías por fila, los paneles sin inclinación requieren tres tuberías unidas por fila de estas, en cambio los paneles con inclinación requieren cinco tuberías, más una proporción de otro par, para hacer el pasillo a un costado, como se muestra en Figura 4.19. Mayor detalle de la disposición del arreglo de paneles inclinados se encuentra en el Anexo B plano 3.



Figura 4.19 Disposición de filas en arreglo con paneles inclinados. Fuente: Elaboración propia.

Usar los paneles de manera longitudinal, como se usa con los paneles inclinados, provoca tener menos espacio entre paneles y disminuir un poco más la evaporación, aunque el costo de usar más tubería por panel tiene que ser compensado por el beneficio económico de disminuir la evaporación.

Por otra parte, para el diseño del parque con seguimiento se diseña una estructura octogonal que cuenta, con tuberías de PVC de seis metros de longitud máxima, entonces el largo de los lados del octágono será de 6 metros, con este largo se intenta evitar la unión de dos tuberías, ya que más uniones provocan una mayor probabilidad de falla. Se puede ver el diseño en la Figura 4.20. Este diseño se muestra por abajo para poder notar las tuberías y el sistema de sujeción.

Las tuberías de los costados sirven de pasillo y además es la estructura fija que permite que el resto gire independiente del movimiento del pasillo, estas tuberías unidas por codos en  $45^\circ$  están indicadas con el número 1, las tuberías de dentro siguen el mismo patrón de tuberías que para los sistemas fijos, en particular tienen un gran parecido a los paneles con inclinación, ya que al estar inclinados también cuentan con separación entre paneles.

Asimismo, está la estructura móvil que es la que se encuentra dentro del octágono, aquí las tuberías están fijadas entre sí por barras de acero que permiten el movimiento de toda la estructura como una sola, así pues está la estructura que se mantiene fija con respecto a lo de adentro, el octágono está fijado por una cruz, en el centro de esta se encuentra la unión de ambas estructuras (fija y móvil) indicado con el número 2, esta unión debe ser lo suficientemente rígida para soportar oscilaciones de la estructura, pero no soporta el peso de esta.

Además, está el motoreductor indicado con el número 3, la cual es el encargado de hacer girar el sistema a través de una argolla circular que rodea toda la estructura flotante interna. Los cables pasan por debajo de la estructura llegando a la superficie cuadrada mostrada en la Figura 4.20, las cuatro estructuras octogonales forman un arreglo de paneles, con 8 filas de 15 paneles en serie en total.

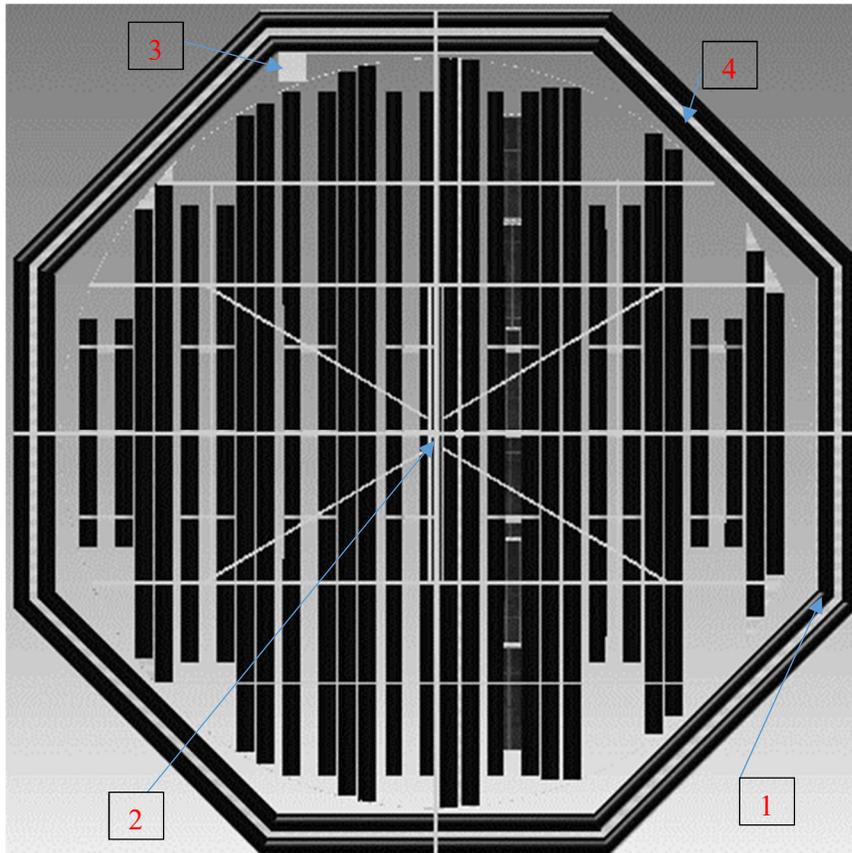


Figura 4.20 Diseño de seguimiento con estructura flotante de PVC. Fuente: Elaboración propia.

La misma estructura anterior pero en el sentido correcto y en un ángulo que se puedan ver los rieles u otro tipo de componentes, se muestra en la Figura 4.21 donde se encuentra el motorreductor se indica con el número 3, los rieles para montar los paneles están indicados con el número 2, se muestran tres filas de pasillos dentro de la estructura giratoria con el número 4, se muestra algunos codos con el número 1, donde van más tablas para pasillos, por último, se muestra con el número 5 solo una fila de paneles Ja Solar.

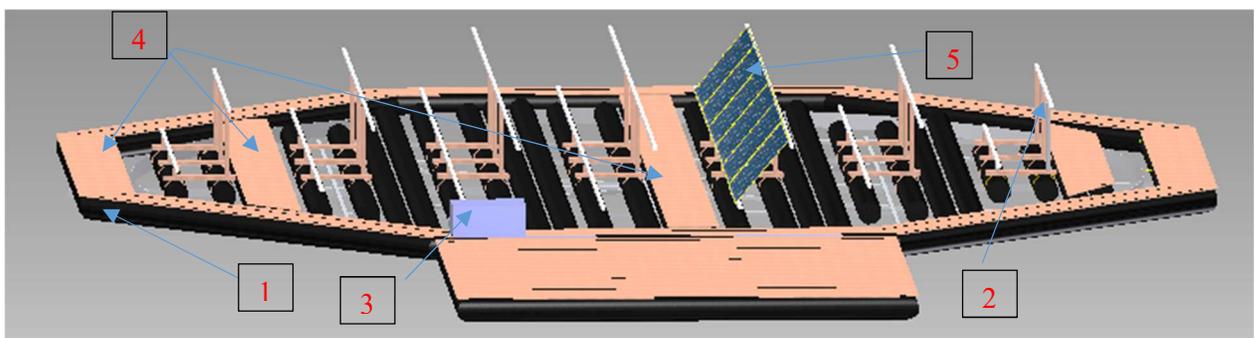


Figura 4.21 Disposición de elementos en estructura octogonal. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran los elementos con la numeración usada en las figuras anteriores, además en la Tabla 4.29 se muestra el elemento motorreductor con el 14 ya que es la continuación de los elementos descritos anteriormente en la Tabla 4.19, el cual también suma peso a la estructura, pero en particular para la estructura

con seguimiento hay más pasillos que en las otras estructuras por lo que se puede sumar más peso a la estructura sin tener problemas de flotabilidad.

Tabla 4.29 Numeración de elementos del arreglo de paneles con seguimiento. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Elemento
1	Codos de PVC
2	Estructura para giro
3	14. Motoreductor
4	Pasillos
5	13. Panel Ja Solar

La disposición de las cuatro estructuras octogonales se muestra en la Figura 4.22, en este caso el inversor no puede ir en la tierra, por posibles problemas de conexión, en los casos de seguimiento tiene que ir instalada sobre la misma estructura flotante, en este caso la superficie cuadrada diseñada para eso.

Además, se muestran las dimensiones principales del arreglo, con 29.728 mm por lado, es decir, aproximadamente el arreglo usa un espacio cuadrado de 30 metros de lado. Con un cuadrado menor en el centro para instalar los inversores y el sistema de control. Los demás arreglos pueden ser instalados completamente pegados a cualquier otro, ya que unen a través de las estructuras octogonales.

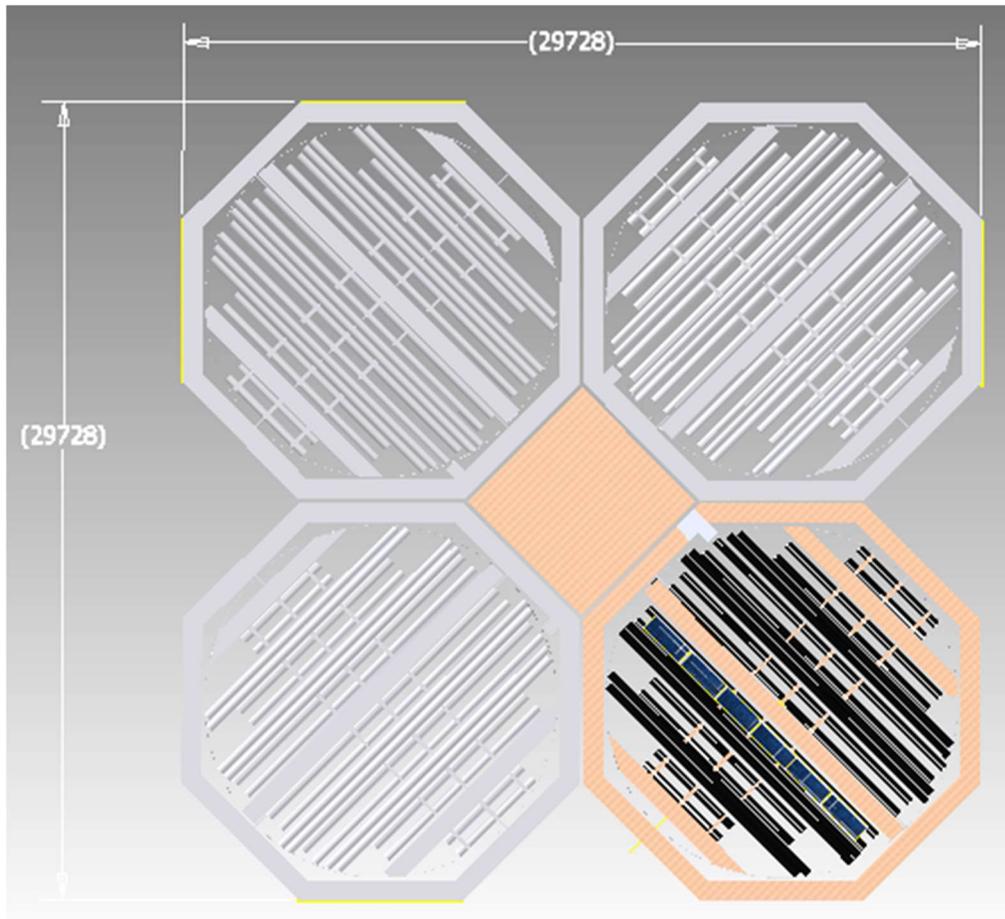


Figura 4.22 Arreglo de la estructura con seguimiento. Fuente: Elaboración propia.

## 4.6 Disposición de las plantas en los depósitos.

Se tendrá la cantidad de arreglos necesarios para cubrir una hectárea de superficie, para eso se acude al Anexo B y a partir de las dimensiones del arreglo mostradas en la Tabla 4.30, se calcula que con 20 arreglos se obtiene una superficie cercana a una hectárea, por lo tanto, para efectos de una mejor comparación entre los sistemas, todos los cálculos serán hechos a partir de 20 arreglos, independiente si es para un sistema con inclinación o seguimiento. Además, se calcula el área tapada que es la cual disminuye la evaporación.

Tabla 4.30 Área ocupada para un arreglo con paneles sin inclinación. Fuente: Elaboración propia.

Ancho [m]	Largo [m]	Área por arreglo [m <sup>2</sup> ]	Cantidad	Área ocupada [m <sup>2</sup> ]	Área tapada [m <sup>2</sup> ]
26,3	18	473,4	20	9.468	9.468

Cuando se tiene arreglos inclinados, para cada depósito se tienen diferentes magnitudes y tapan en distinta medida la evaporación, la Tabla 4.31, resume las dimensiones principales, el área ocupada y tapada, para cada depósito, calculado a partir de las dimensiones dadas por el plano 4 del Anexo B.

Tabla 4.31 Área ocupada para un arreglo con paneles inclinados. Fuente: Elaboración propia.

Depósito	Ancho [m]	Largo [m]	Área por arreglo [m <sup>2</sup> ]	Cantidad	Área ocupada [m <sup>2</sup> ]	Área tapada [m <sup>2</sup> ]
Ovejería	19,3	30,6	589,2	20	11.784,9	9.144,9
El Mauro	18,6	30,6	569,1	20	11.381,4	9.184,8
Laguna Seca	16,6	30,6	508,4	20	10.168,6	9.292,6

Para el sistema con seguimiento, se hace una aproximación del área ocupada, pero se calcula correctamente el área tapada a través de las dimensiones del diseño en CAD, para el área ocupada, se consideran como parte del sistema las áreas achuradas con verde de la Figura 4.23, por supuesto los cuadrados en blanco no pueden quedar excluidos del área ocupada, los cuadrados naranjos son los lugares donde estarán los inversores.

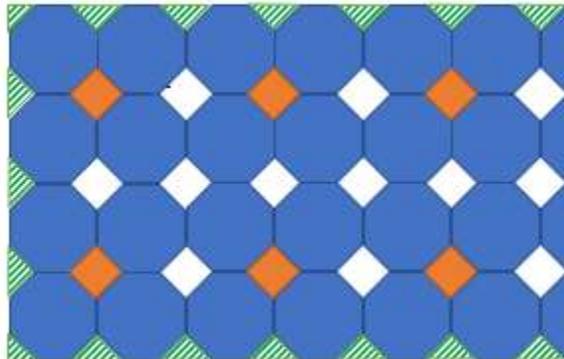


Figura 4.23 Segmento del diseño de la planta con seguimiento, ilustración del área incluida. Fuente: Elaboración propia.

Como son 20 arreglos, el área total es fácil de calcular y basta usar las dimensiones de la Figura 4.22, las cuales se muestran en la Tabla 4.32 donde también se muestra el resultado del área ocupada y del área tapada.

Tabla 4.32 Área ocupada para el arreglo con seguimiento. Fuente: Elaboración propia.

Ancho [m]	Largo [m]	Área por arreglo [m <sup>2</sup> ]	Cantidad	Área ocupada [m <sup>2</sup> ]	Área tapada [m <sup>2</sup> ]
29,7	29,7	883,7	20	17.673,9	8.945,6

Es necesario que la planta se ubique cercano a las redes eléctricas, estas se muestran en la Figura 4.24, se puede ver que se cuenta con un transformador en el mismo depósito, lo cual es bastante útil para el uso de la energía de la planta eléctrica.



Figura 4.24 Redes de distribución eléctrica cercanas al depósito. Fuente: SEC Infraestructura Eléctrica.

Además, se debe tener claro a que subestación alimentará, en la Figura 4.25 se muestran las subestaciones más cercanas al depósito Ovejería en conjunto con las redes de transmisión, esto muestra una factibilidad en la conexión eléctrica, debido a la cantidad de estas y a la cercanía con el depósito.

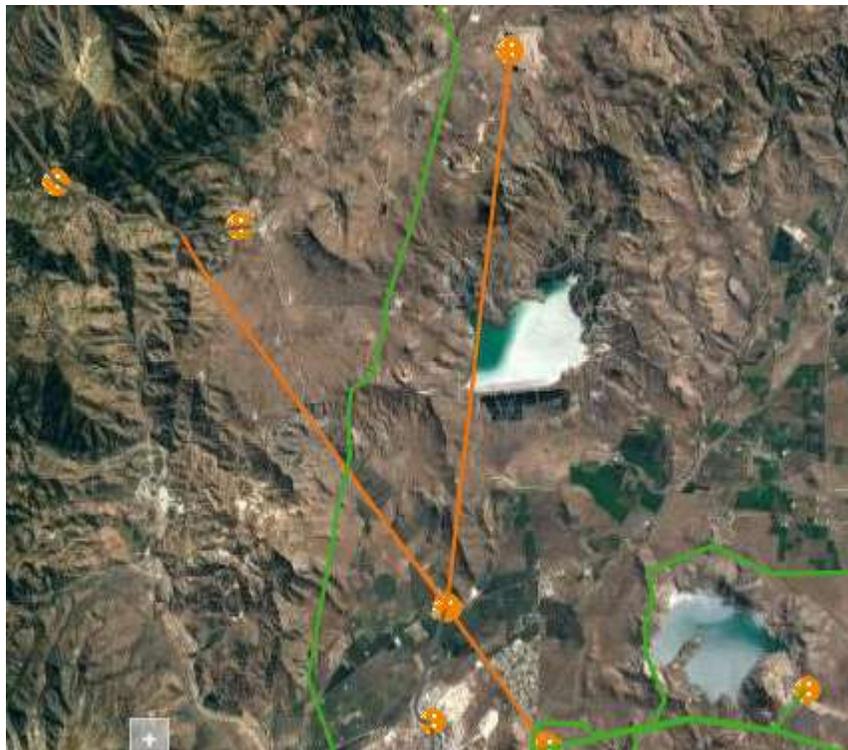


Figura 4.25 Subestaciones eléctricas cercanas al depósito Ovejería. Fuente: IDE.

Luego los 20 arreglos se deberían ubicar de la siguiente forma como se muestra en la Figura 4.26 para estar más cercano a las redes eléctricas, se muestran las dimensiones generales de la planta, se representan a los inversores y al sistema de control ubicado en tierra con un rectángulo en naranja y los arreglos con rectángulos en gris.



Figura 4.26 Planta con inclinación y sin inclinación en depósito Ovejería. Fuente: Elaboración propia.

Para representar las redes de transmisión eléctrica en conjunto con subestaciones eléctricas se usa la simbología del Ministerio de Energía en el software Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) mostrada en la Figura 4.27.

#### Línea de Transmisión

-  220 kV
-  154 kV
-  110 KV
-  66 kV
-  < 66 kV

#### Subestaciones



Figura 4.27 Simbología para figuras del IDE. Fuente: IDE.

Las redes de transmisión eléctrica y las subestaciones cercanas al depósito El Mauro se muestran en la Figura 4.28, cabe destacar que esta minera cuenta con una subestación eléctrica para los procesos que se hacen cercanos al depósito.

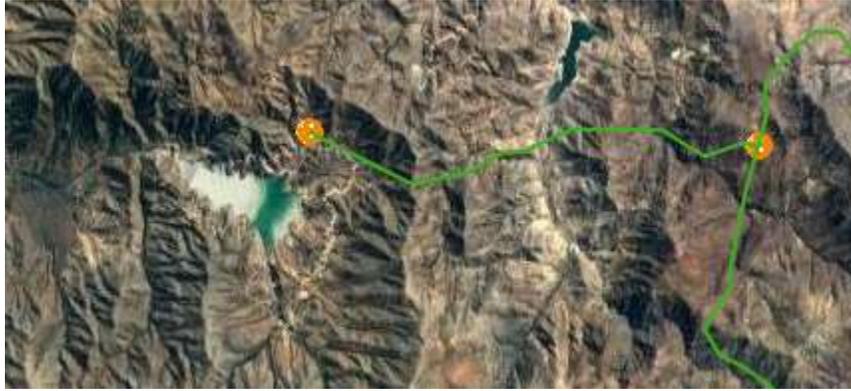


Figura 4.28 Subestaciones y redes de transmisión. Fuente: IDE.

Considerando la localidad de las redes eléctricas y el color azulado de un sector del depósito, el que indica un mayor volumen de agua. El mejor lugar para colocar los arreglos es el que se muestra en la Figura 4.29, donde además se puede ver un set de bombas en la esquina superior derecha de la planta.



Figura 4.29 Planta con inclinación y sin inclinación en depósito El Mauro. Fuente: Elaboración propia.

Las redes de transmisión y las subestaciones eléctricas cercanas al depósito laguna Seca son mostradas en la Figura 4.30, en la cual se considera que existe una gran cantidad de subestaciones y existen redes eléctricas cercanas al depósito Laguna Seca, esta minera cuenta con una subestación eléctrica para los procesos que se hacen cercanos al depósito.



Figura 4.30 Redes de transmisión y subestaciones eléctricas cercanas al depósito Laguna Seca. Fuente: IDE.

Considerando la localidad de las redes eléctricas y el color azulado de un sector del depósito. El mejor lugar para colocar los arreglos es el que se muestra en la Figura 4.31. al igual que en las plantas anteriores, el inversor y el sistema de control es colocado en tierra, cercano a los arreglos.

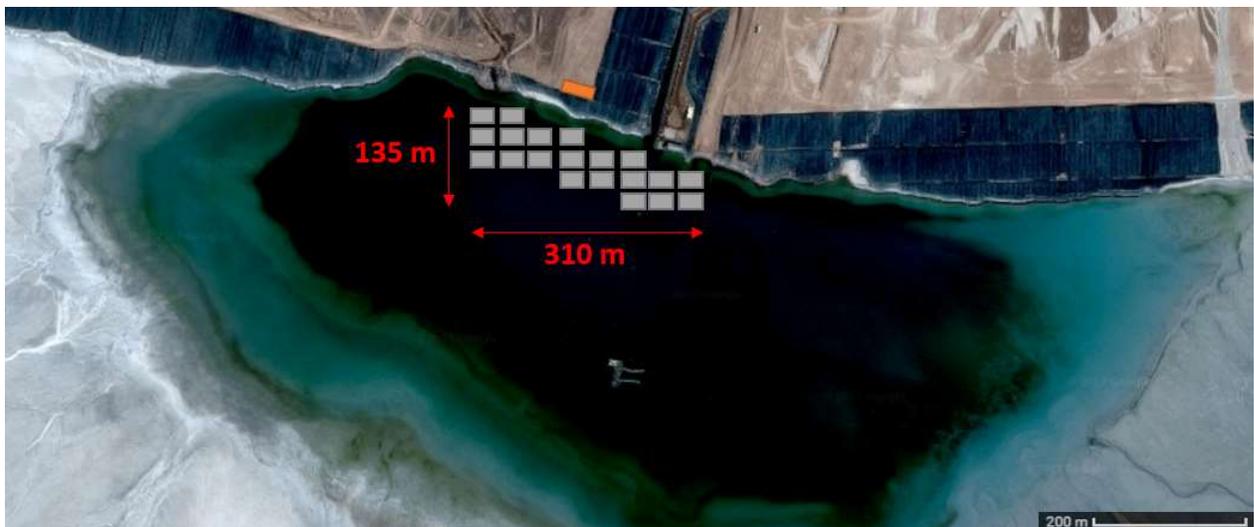


Figura 4.31 Planta con inclinación y sin inclinación en depósito Laguna Seca. Fuente: Elaboración propia.

Se omite la representación de la planta con seguimiento en los depósitos, debido a que esta se debe colocar en las mismas posiciones que las anteriores, con la diferencia de que la unión entre arreglos es sin separación, y la estructura final es de mayor tamaño. Se muestra la disposición de 20 arreglos en la Figura 4.32 de una planta con seguimiento, cabe destacar que cada arreglo puede ir al lado de cualquier otro y no es necesario que la disposición final forme un rectángulo.

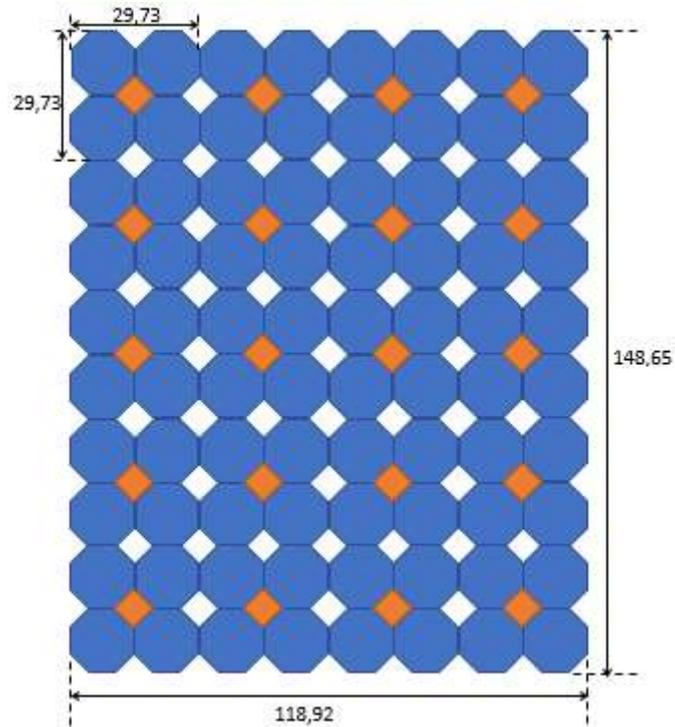


Figura 4.32 Representación gráfica de la planta con seguimiento. Fuente: Elaboración propia.

## 4.7 Evaluación económica

Ya sabiendo la disposición de los paneles y el área ocupada se puede calcular la energía generada y el agua que se deja de evaporar, para lo primero se usa la herramienta entregada por el ministerio de energía que usa los datos del explorador solar, y para lo segundo se usan los datos de evapotranspiración obtenidos de la Red Agrometeorológica de INIA y del ministerio de agricultura.

### 4.7.1 Energía

La energía producida en cada uno de los depósitos con los paneles sin inclinación es mostrada en la Figura 4.33 en donde se puede apreciar la estacionalidad provocada por los días de invierno y los días de verano. Se puede ver que las plantas en los depósitos El Mauro y Ovejería se genera casi la misma energía, eso es debido a la cercanía de estos dos depósitos, al contrario de Laguna Seca que se encuentra más al norte donde la radiación es mayor lo cual provoca una mayor generación de energía.

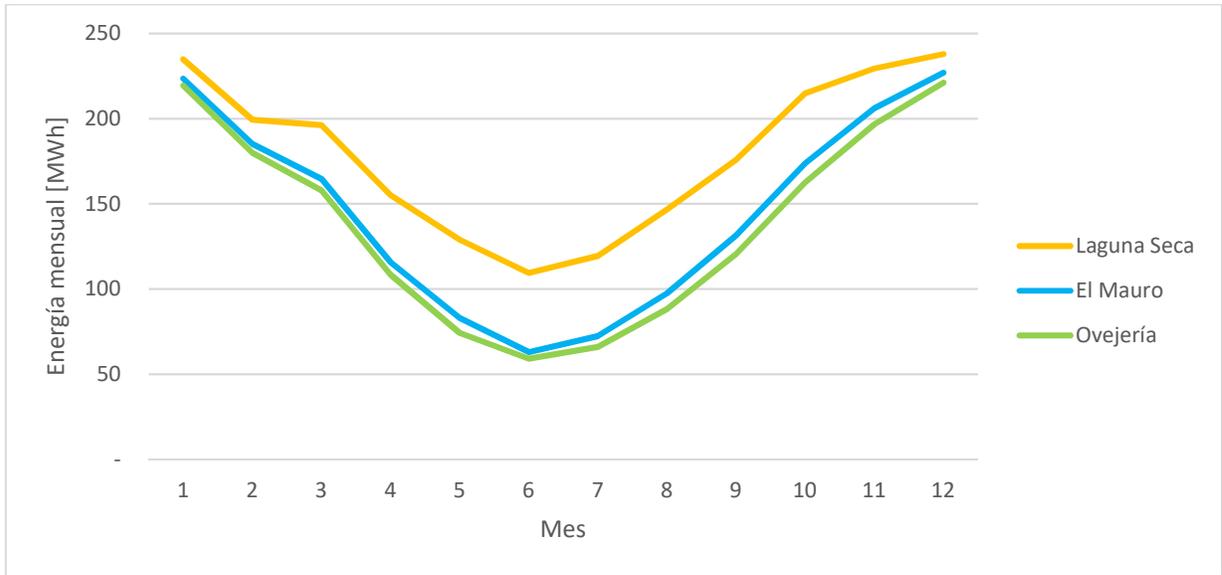


Figura 4.33 Energía generada por planta con paneles sin inclinación. Fuente: Elaboración propia.

Luego se tiene la energía producida en cada uno de los depósitos con los paneles con inclinación en la Figura 4.34, igual a lo anteriormente señalado, las plantas ubicadas en los depósitos El Mauro y Ovejería generan casi la misma energía, pero El Mauro en ambos casos genera un poco más que Ovejería debido a que se encuentra más hacia el norte donde en particular en Chile, mientras más al norte se encuentre la planta mayor es la energía disponible.

Por otro lado, se puede ver una singularidad en la Figura 4.34 en los meses 3 y 10 para el depósito Laguna Seca en donde la generación de energía es mayor que la de los otros depósitos, pero para los meses de verano la generación es menor, se tiene que entender que para el cálculo de la inclinación se tomó como opción la mayor generación de energía anual, es por eso que pueden aparecer estas singularidades.

Cabe destacar además que la caída de generación es mucho mayor para los depósitos El Mauro y Ovejería que para Laguna Seca, esto se puede notar porque los máximos de los dos primeros depósitos son mayores que el máximo de Laguna Seca y el mínimo de los dos depósitos es menor que el mínimo del depósito Laguna Seca. Por lo que la estacionalidad en las plantas es más notoria en Ovejería y El Mauro.

La energía producida por los paneles con seguimiento es mostrada en la Figura 4.35, en conjunto con los paneles con y sin inclinación del depósito Laguna Seca. Se puede ver que la energía generada entre un panel con y sin inclinación es bastante parecida, no así con los paneles con seguimiento, la cual incluso la mínima generación en el sexto mes está por sobre de cualquier mes de las otras dos formas de generación.

Se resumen los modos en que se ponen los paneles de la siguiente forma, ‘Sin’ para paneles sin inclinación, ‘Con’ para paneles con inclinación y ‘Seg’ para los paneles con seguimiento, como se muestra en la Tabla 4.33. Esta abreviación es usada para algunas tablas para disminuir el espacio en ellas.

Tabla 4.33 Abreviación para tablas. Fuente: Elaboración propia.

Sin	Con	Seg
Sin inclinación	Con inclinación	Seguimiento

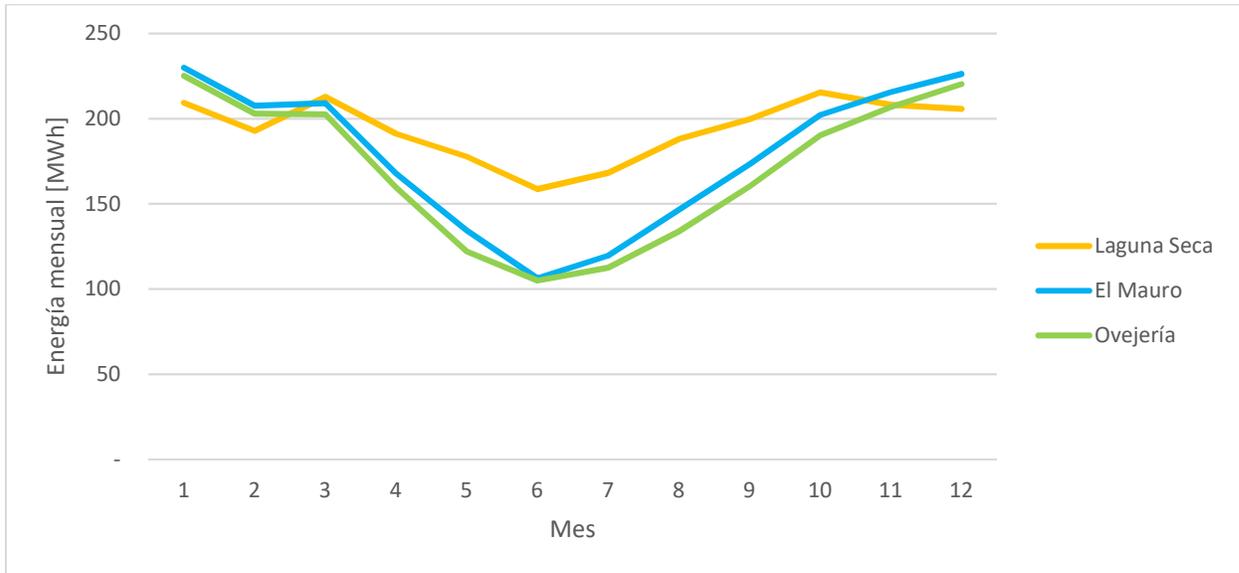


Figura 4.34 Energía generada por planta con paneles con inclinación Fuente: Elaboración propia.

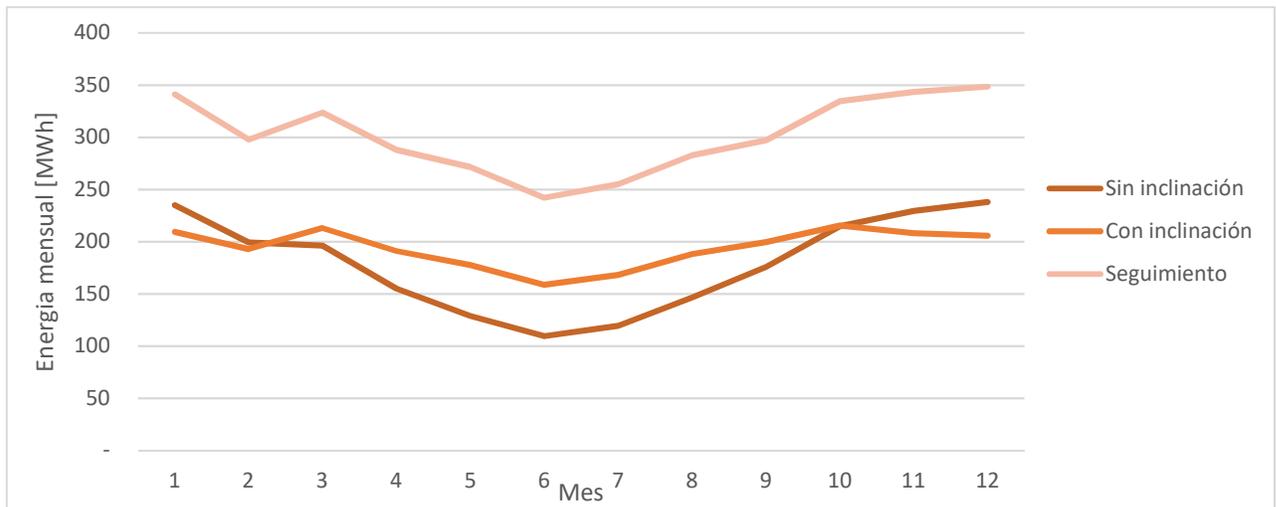


Figura 4.35 Energía generada en Laguna Seca. Fuente: Elaboración propia.

La energía generada anual y la densidad de energía por área se muestra en la Tabla 4.34. Lógicamente los paneles con inclinación generan mayor energía que los paneles sin inclinación y pasa lo mismo con los paneles con seguimiento. Con respecto a la densidad de energía, esta es mayor para paneles con inclinación que para paneles sin inclinación, es decir, se genera más energía por metro cuadrado, pero no pasa lo mismo con los paneles con seguimiento, pese a que estos generan más energía anual, el área ocupada es demasiado alta, lo que provoca tener menor densidad de energía.

Tabla 4.34 Energía generada anual y densidad de energía por área ocupada. Fuente: Elaboración propia.

	Ovejería		El Mauro		Laguna Seca		
	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Seg
Anual [MWh]	1.657	2.044	1.746	2.141	2.150	2.327	3.627
Densidad [MWh/m <sup>2</sup> ]	170	184	179	199	220	249	205

Como precio de venta se usa el precio nudo de corto plazo que es el cual rige para cuando se instala una planta mayor a 100 kW para un cliente libre, cabe destacar que a este precio se le puede vender a las empresas de generación de energía, el cual se estima en el mes de marzo del 2017 en 60 USD/MWh [15], además si la empresa minera compra energía debe pagar el peaje de transmisión que se estima en 20USD/MWh, pese a eso al momento de vender esta energía al sistema el pequeño medio de generación distribuida (PMGD) queda exento de este pago si la planta es de menos de 9MW. Aun así, el precio de venta a la minera se considera a 80 USD/MWh, considerando el precio nudo de mercado y los peajes por transmisión, ya que la minera independiente a quien le compre energía, le será cobrado el peaje de transmisión. Este valor de venta de energía es usado para los tres depósitos.

Considerando este precio de la energía se puede medir cual panel da mayor ingreso por el costo del mismo. Esto se muestra en la Tabla 4.35. se muestra que el ingreso por costo es mayor para el panel Yingli, lo que indica que el Ja solar es más conveniente en términos económicos. Pero Ja solar usa menos espacio para generar la misma energía.

Tabla 4.35 Comparación de paneles por energía generada en Laguna Seca. Fuente: Elaboración propia.

Panel	Ja Solar	Yingli
Energía anual	2.433.957,4	2.331.128,8
Precio Energía	51,92	51,92
<b>Ingreso</b>	<b>126.371.069,86</b>	<b>121.02.205,84</b>
Wp/panel	355	320
Cantidad	3000	3000
Precio Wp	283,8	239,8
<b>Costo</b>	<b>302.247.000</b>	<b>230.208.000</b>
<b>Ingreso/costo</b>	<b>0,42</b>	<b>0,53</b>

#### 4.7.2 Disminución de la evaporación

Se asume que no se deja de evaporar el 100% del área tapada, sino que solo un 80% para los paneles sin inclinación ya que se asemeja a las cubiertas modulares descritas en los antecedentes en la sección 2.2 y un 69% para paneles con inclinación ya que se parece más a la capa suspendidas, este último caso incluye los paneles con seguimiento, descritas en la misma sección.

Se usan los datos de evapotranspiración de estaciones meteorológicas<sup>7</sup> cercanas al depósito. En particular para el depósito Laguna Seca se comparan los datos obtenidos del lugar Socaire y los datos de evaporación de un balance de aguas hecho el 2012 [16]. Los cuales se muestran en la Tabla 4.36, donde la columna balance indica los valores obtenidos por el balance antes descrito y la columna estación son los datos de evapotranspiración entregados por la estación meteorológica de Socaire, la cual indica un nivel menor o igual de evaporación en todos los meses. Por lo que se supone que los valores obtenidos de las estaciones son más conservadores.

<sup>7</sup> <http://www.agromet.inia.cl/estaciones.php> [Consulta: 12/07/2017]

Tabla 4.36 Comparación de los datos de evaporación [16] y los de evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Promedio
Balance	0,33	0,26	0,25	0,18	0,15	0,11	0,12	0,14	0,20	0,26	0,29	0,33	0,22
Estación	0,21	0,18	0,18	0,15	0,12	0,11	0,12	0,14	0,17	0,20	0,21	0,23	0,17

Para el depósito El Mauro se usan los datos de la estación meteorológica Salamanca ubicada en Chilpepín, la cual se encuentra a 27 km del depósito, siendo la estación más cercana. Por otro lado, para el depósito Ovejería se usa el promedio de dos estaciones, debido a que estas dos se encuentran casi a la misma distancia del depósito, aproximadamente a 30 km.

En el balance hídrico hecho en Ovejería [17] se entrega información de la evaporación anual y de la máxima evaporación obtenida, las cuales son 1019,1 mm y 169,3 mm respectivamente. Los valores promedio de las estaciones no difieren mucho, como se puede apreciar en la Tabla 4.37, con errores porcentuales menores al 3%, lo cual se considera razonable, por lo que los datos para estimar la evaporación anual serán los de la estación, al igual que en los otros dos depósitos.

Tabla 4.37 Comparación de los datos de evaporación de la estación y del balance. Fuente: Elaboración propia.

Datos	Max mes	Anual
Balance mm	169,3	1019,1
Estación mm	171,13	1046,76
Error %	1,08	2,71

Se muestra en la Figura 4.36, la estacionalidad de la evaporación en los tres depósitos de relaves, la cual sigue la misma relación que la generación de energía, la cual es que aumenta la evaporación en el verano y disminuye en el invierno, entonces se tiene mayor cantidad de agua disponible en invierno, no así en verano, que por producto de la falta de agua se llega a parar la producción.

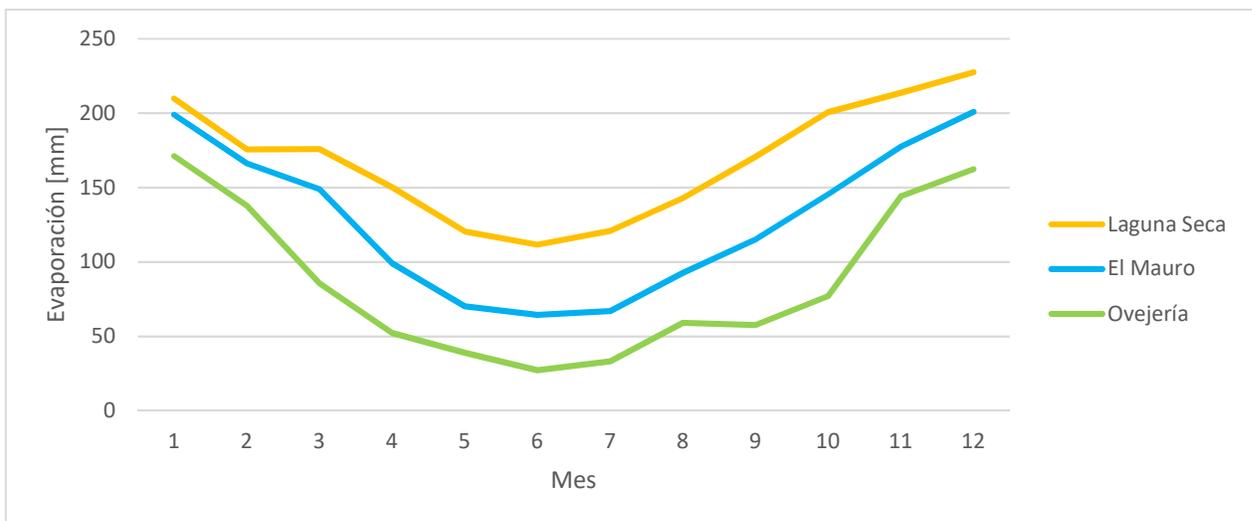


Figura 4.36 Evaporación por mes en los depósitos de relaves. Fuente: Agromet.inia.cl

En la Tabla 4.38 se puede ver que el área tapada es menor en los paneles con inclinación y con seguimiento, y esto es debido a que los paneles al estar inclinados usan menos espacio en el plano horizontal, pese a eso, esta inclinación provoca tener mayor espacio entre paneles, por lo tanto, usa más espacio considerando la sombra que ellos provocan.

Tabla 4.38 Área tapada en los distintos depósitos y plantas, con el total de agua resguardada. Fuente: Elaboración propia.

	Ovejería		El Mauro		Laguna Seca		
	Sin	Con	Sin	Con	Sin	Con	Seg
Área tapada [m <sup>2</sup> ]	9.468	9.145	9.468	9.185	9.468	9.293	8.946
Agua resguardada [m <sup>3</sup> ]	7.929	6.605	11.715	9.802	15.305	12.956	12.473

El precio del agua se obtiene de la superintendencia de servicios sanitarios a partir del lugar donde se ubican los depósitos, lo cual sirve como una referencia del precio del agua que puedan tener, a partir de esto se supone que pueden tener la mitad del consumo de agua es cobrado como tarifa normal y la otra mitad es cobrada como sobreconsumo.

Los precios del agua se muestran en la Tabla 4.39 donde se puede apreciar que el precio del agua es mayor a medida que los depósitos están más al norte, llegando a valores de hasta 3 veces más alto.

Tabla 4.39 Precios de agua para los distintos depósitos. Fuente: Elaboración propia.

Valor	Ovejería	El Mauro	Laguna seca
Normal [\$CLP]	270,78	877,58	940
Sobreconsumo [\$CLP]	811,22	1134,93	2506,14
Promedio [\$CLP]	541	1006,26	1723,07

### 4.7.3 Consideraciones generales

Para la evaluación económica de este proyecto se consideran los siguientes aspectos:

- Se usan precios de los productos a utilizar que estén disponibles en línea o en su defecto, a partir de catálogos o cotizaciones hechas por vía e-mail o telefónicas. Algunas de estas cotizaciones no incluyen los descuentos por economías de escala.
- Los ingresos son considerados tanto por el ahorro por la evaporación, suponiendo que esa agua podría ser utilizada en los procesos, y el pago de la energía eléctrica a la planta fotovoltaica flotante.
- El horizonte de evaluación es de 20 años con periodos de evaluación de un año.
- Se supone que en el primer año la planta opera a su máxima capacidad
- Se realiza el flujo de caja del proyecto puro, es decir sin financiamiento, luego a partir de este se realizan los análisis de sensibilidad.
- La depreciación es de 10 años para todos los equipos eléctricos y de 20 años para los otros materiales.
- La vida útil de los productos fue considerada para la total duración de la planta, es decir para 20 años.
- Todos los precios y costos son expresados en \$CLP a menos que se exprese lo contrario.

### 4.7.4 Inversión inicial

Los costos se estiman según se muestra en la Tabla 4.40, donde se muestra el valor del ítem en pesos chilenos por watt peak, para efectos de esta estimación se consideran todas las plantas de 1 MW de potencia peak.

Tabla 4.40 Estimaciones de costo por construcción por watt peak del sistema. Fuente: [18]

Ítem	\$CLP/Wp
Montaje y fijaciones.	75,7
Instalación eléctrica	136,3
Sistema de seguridad	37,9
Ingeniería	60,6

Los costos en tuberías se obtienen de la página Vinilit la cual entrega el precio de las tuberías y sus accesorios como coplas y taponés, cabe destacar que la tubería de PVC de 200mm mide 6 metros de largo, pese a eso, en la tabla se expresa su valor por metro, y la cantidad está en función de los metros que se necesitan.

Tabla 4.41 Tuberías para los diferentes arreglos. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	PVC 200	Copla	Tapón	Codo 90°	Codo 45°	
Cantidad Sin	720	80	80	0	0	
Cantidad Con	750	90	84	0	0	
Cantidad Seg	1431	352	544	12	64	
Precio \$CLP	6.060	19.070	13.480	19092	19333	Total
Costo Sin	4.363.200	1.525.600	1.078.400	0	0	6.967.200
Costo Con	7.272.000	3.928.420	1.132.320	0	0	12.332.740
Costo Seg	8.670.648	6.712.640	7.333.120	229.104	1.237.312	24.182.824

Los costos asociados al equipamiento para la instalación de los paneles fotovoltaicos son obtenidos de Digishop, en la Tabla 4.42, donde se muestra la cantidad y el precio de los elementos.

Tabla 4.42 Equipamiento de fijación de paneles para los diferentes arreglos. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Riel	Grapa intermedia	Grapa final	Inclinación baja	Inclinación alta	
Cantidad Sin	60	240	120	60	60	
Cantidad Con	80	240	120	80	80	
Cantidad Seg	120	92	240	120	120	
Precio \$CLP	28.700	600	600	3000	10500	Total
Costo Sin	1.722.000	144.000	72.000	180.000	630.000	1.938.000
Costo Con	2.296.000	144.000	72.000	240.000	840.000	3.592.000
Costo Seg	3.444.000	55.200	144.000	360.000	1.260.000	5.263.200

Elementos como la madera para el pasillo y para las placas de madera fueron cotizadas en diferentes lugares, en la Tabla 4.43 se muestran estos elementos, además se agrega la columna “Otros”, que corresponde a pernos, tuercas y golillas necesarias para la sujeción de todos los elementos.

Los paneles fotovoltaicos son de dos tipos solamente Yingli y Ja Solar, y se cotizan en diferentes lugares a través de correos electrónicos y llamados telefónicos, obteniéndose precios por Wp. En la Tabla 4.44 se muestra el total de Wp por cada planta y así mismo el costo final por paneles.

Tabla 4.43 Equipamiento de fijación para los diferentes arreglos. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Madera piso	Placa de madera	Abrazadera	Otros	
Cantidad Sin	90	20	600	120	
Cantidad Con	120	30	600	120	
Cantidad Seg	216	48	480	96	
Precio \$CLP	24.490	18.000	1.140	1.000	Total
Costo Sin	2.204.100	360.000	684.000	120.000	3.368.100
Costo Con	2.938.800	540.000	684.000	120.000	4.282.800
Costo Seg	5.289.840	864.000	547.200	96.000	6.797.040

Tabla 4.44 Costo de paneles por arreglo. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Yingli	Ja Solar
Wp Sin	47.250	-
Wp Con	0	53.250
Wp Seg	0	42.600
Precio \$CLP /Wp	239,8	283,8
Costo Sin	11.328.485	-
Costo Con	-	15.113.395
Costo Seg	-	12.090.716

Los equipos eléctricos son iguales para todas las plantas, ya que se sobredimensiona el cableado para la planta con inclinación, los equipos eléctricos se muestran en la Tabla 4.45 con la descripción que sirve para identificar el equipo. Cabe destacar que el motoreductor fue calculado para la mover todo el peso y vencer la fuerza de roce que provoca el agua en la estructura giratoria. El sistema de monitoreo es uno para toda la planta por eso se requiere 1/20 en un arreglo.

Tabla 4.45 Equipos eléctricos para un arreglo. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Descripción	Precio \$CLP	Cantidad	Total
Inversor	SMA Sunny Tripower 60000TL-40	5.733.718	1	5.733.718
Combiner box	SMA DC - Combiner Box para STP60000	753.316	1	753.316
Protecciones	Phoenix Contact PV-SET 5ST	267.682	1	267.682
Medidor bidireccional	Kamstrup - Medidor Electrónico Trifásico	246.500	1	246.500
Cables	RADOX cable solar 4 rd, bobina de 500m Cable solar, 4mm <sup>2</sup> , tres colores y LAPP OLFLEX SOLAR XLR-R 1x16mm <sup>2</sup> 500m	2.293.301	1	2.293.301
Monitoreo	Solar-Log 1000	848.516	0,05	42.426
Motoreductor	Motor trifásico de 0,3HP 1500rpm ABB	108.899	4	435.596

El total de todos los elementos anteriores dan el costo del proyecto en equipamiento, y se muestran en la Tabla 4.46, cabe destacar que el precio de los paneles con inclinación da bastante más elevado que los paneles sin inclinación.

Tabla 4.46 Costo en equipamiento de las diferentes plantas. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Tuberías	Fijación	Paneles	Equipamiento eléctrico	Total arreglo	Total planta
Costo Sin	6.967.200	5.306.100	11.328.485	9.336.943	32.938.728	658.774.560
Costo Con	12.332.740	7.874.800	15.113.395	9.336.943	44.657.878	893.157.551
Costo Seg	24.182.824	12.060.240	12.090.716	9.772.539	58.106.319	1.162.126.372

Los costos por construcción e ingeniería de los arreglos y de la planta, se muestran en la Tabla 4.47, estas estimaciones son buenas para paneles fijos, pero por ejemplo, la ingeniería de la planta con seguimiento da menor que las otras plantas, lo cual no tiene sentido, por lo tanto, se estimará el costo de la planta con seguimiento como si fuese la planta con inclinación.

Tabla 4.47 Costos por construcción e ingeniería de un arreglo. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Montaje y fijaciones.	Instalación eléctrica	Sistema de seguridad	Ingeniería	Total arreglo	Total planta
Costo Sin	3.576.825	6.440.175	1.790.775	2.863.350	14.671.125	293.422.500
Costo Con	4.031.025	7.257.975	2.018.175	3.226.950	16.534.125	330.682.500
Costo Seg	3.224.820	5.806.380	1.614.540	2.581.560	13.227.300	264.546.000

El costo que tiene hacer los flotadores, entre los materiales y el montaje, se puede obtener en la tabla y es un tema importante considerar este valor, ya que empresas como Ciel et terre ofrecen los flotadores puestos en terreno a un valor cercano a 0,3 \$USD/Wp para plantas sobre 400 kWp. Y este es un valor bastante útil en caso de comparaciones. Cabe destacar que la opción de hacer los flotadores podría costar hasta dos veces más que la opción de usar los flotadores Ciel et terre.

Tabla 4.48 Costo de los flotadores instalados. Fuente: Elaboración propia.

Planta	Costo total	\$CLP/Wp	\$USD/Wp
Sin	245.466.000	259,75	0,40
Con	404.150.800	379,48	0,59

Se entrega la inversión total en la Tabla 4.49, en esta se agrupan los costos mostrados en la Tabla 4.46 en la columna llamada equipamiento, por otro lado los costos mostrados en la Tabla 4.47 se agrupan en la columna construcción, cabe destacar que se hace la corrección en el costo en construcción para la planta con seguimiento, igualando esta con el costo en construcción de la planta con inclinación

Tabla 4.49 Inversión total para las diferentes plantas. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Equipamiento	Construcción	Total planta
Costo Sin	658.774.560	293.422.500	952.197.060
Costo Con	893.157.551	330.682.500	1.223.840.051
Costo Seg	1.162.126.372	264.546.000	1.426.672.372

#### 4.7.5 Flujos de caja

Se muestran los indicadores VAN y TIR de las plantas en los depósitos de relaves escogidos, para este análisis se escoge una tasa de descuento de un 8% según opinión de expertos. Los resultados se pueden ver en la Tabla 4.50 que resume los resultados obtenidos del Anexo C.

Tabla 4.50 Resultados de los flujos de caja. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Sin inclinación			Con Inclinación			Seguimiento
	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Laguna S.
Deposito							
VAN [\$MMCLP]	-26,30	-16,66	116,27	-393,32	-303,23	-127,55	18,02
TIR	3,9%	5,5%	9,6%	3,2%	4,4%	6,5%	9,7%
Recuperación Inversión [Año]	14	12	9	15	13	11	9

Por lo tanto, para las plantas sin inclinación y con seguimiento en Laguna Seca son factibles económicamente, para las otras, se tiene un VAN negativo y una TIR bajo el 8%.

#### 4.7.6 Análisis de sensibilidad

Se analizan los casos en que el precio de la energía aumenta 25%, y se verá cuanto tiene que disminuir para que al menos una planta ya no sea rentable. Por otro lado, se verá que pasa si el costo de los flotadores disminuye en un 25%. Se estudia el caso en que la disposición de los paneles con inclinación sea la misma que para los paneles sin inclinación. Por último, se analiza el caso en que se usan flotadores de Ciel et terre.

Si se aumenta el precio de la energía en un 25%, en la Tabla 4.51 se puede notar que se hace rentable la planta de El Mauro con paneles sin inclinación y además se hace rentable la planta con inclinación de Laguna Seca, la única rentable con inclinación y fija. Las dos plantas que ya eran rentables antes, ahora aumentan su rentabilidad, siendo bastante más favorable invertir en ellas.

Tabla 4.51 Resultados del flujo de caja cuando el precio de la energía aumenta en 25%. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Sin inclinación			Con Inclinación			Seguimiento
	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Laguna S.
Deposito							
TIR	6,6%	8,2%	12,6%	5,9%	7,1%	9,2%	13,0%
VAN [\$MMCLP]	-9,19	1,36	338,25	-182,29	-82,19	112,64	55,45

Luego a partir de iteraciones disminuyendo el precio de la energía, en la Tabla 4.52 con una disminución de 13% en el precio de venta de la energía, la planta con seguimiento ubicada en Laguna seca no es rentable y solo la planta sin inclinación se mantiene rentable con una TIR de 8% donde solo el VAN da un apoyo para el incentivo de invertir en el proyecto, esta disminución significa tener el precio de la energía en 69,6 \$USD/Wp.

Tabla 4.52 Resultados del flujo de caja cuando el precio de la energía disminuye en 13%. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Sin inclinación			Con Inclinación			Seguimiento
	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Laguna S.
Deposito							
TIR	2,3%	4,0%	8,0%	1,6%	2,8%	5,0%	7,9%
VAN [\$MMCLP]	-35,20	-26,04	0,84	-503,05	-418,18	-252,45	-1,45

A continuación, se muestran los resultados suponiendo que todo el sistema de flotación cuesta un 25% menos, en la Tabla 4.53 se muestran los resultados obtenidos por este cambio en los costos de inversión.

Tabla 4.53 Resultados del flujo de caja cuando el costo de los flotadores disminuye en 25%. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Sin inclinación			Con Inclinación			Seguimiento
Deposito	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Laguna S.
TIR	5,0%	6,7%	11,0%	4,5%	5,7%	8,0%	12,1%
VAN [\$MMCLP]	-17,97	-8,34	199,55	-265,48	-175,39	0,29	38,94

Si la disposición de los paneles inclinados fuese de manera perpendicular, es decir, igual a la de los paneles sin inclinación, entonces resulta que tiene el mismo costo en tuberías, para las fijaciones se sumaría el precio de los elementos llamados inclinación alta y baja en conjunto con el precio de las fijaciones dadas para los paneles sin inclinación. El resultado de esto se muestra en la Tabla 4.54.

Tabla 4.54 Costo en equipamiento para una disposición distinta de los paneles con inclinación. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Tuberías	Fijación	Paneles	Equipamiento eléctrico	Total planta
Costo Sin	139.344.000	106.122.000	226.569.704	186.738.856	658.774.560
Costo Con	139.344.000	127.722.000	302.267.895	186.738.856	756.072.751
Costo Seg	483.656.480	241.204.800	241.814.316	195.450.776	1.162.126.372

Por lo tanto, el flujo queda como se muestra en la Tabla 4.55, donde se puede apreciar que la planta con inclinación en Laguna Seca pasa a ser rentable, pero aún se queda atrás de la planta sin inclinación.

Tabla 4.55 Resultados del flujo de caja con disposición de paneles con inclinación distinta. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Sin inclinación			Con Inclinación			Seguimiento
Deposito	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Laguna S.
TIR	3,9%	5,5%	9,6%	4,7%	5,9%	8,2%	9,7%
VAN [\$MMCLP]	-26,30	-16,66	116,27	-247,22	-157,13	18,55	18,02

Considerando el precio de los flotadores de Ciel et terre como 0,3 \$USD/Wp, y el costo del diseño por tuberías como el costo de las tuberías más las fijaciones, entonces el costo final de la planta ronda el valor mostrado en la Tabla 4.56

Tabla 4.56 Costo de los flotadores. Fuente: Elaboración propia.

Flotadores	Ciel et terre	Diseño
Costo Sin	183.705.165	245.466.000
Costo Con	207.032.805	404.150.800

El resultado del flujo de caja para los flotadores se muestra en la Tabla 4.57, se ve que aumenta la rentabilidad de la planta de Laguna Seca, e incluso la planta con inclinación pasa a ser rentable con una rentabilidad aceptable para proyectos fotovoltaicos.

Tabla 4.57 Resultados del flujo de caja cuando se cambian los flotadores por los de Ciel et terre. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Sin inclinación			Con Inclinación		
	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Ovejería	El Mauro	Laguna S.
TIR	4,8%	6,4%	10,7%	5,4%	6,7%	9,1%
VAN [\$MMCLP]	-19,72	-10,08	182,09	-183,23	-93,15	82,54

#### 4.7.7 Proyecto financiado

Se realiza un flujo de caja suponiendo el proyecto financiado a través de un préstamo que se muestra en el Anexo D, el total de este será de 70% de la inversión inicial a 20 años, con una tasa de anual de 5,5%, mediante el pago de cuotas anuales fijas. Los resultados del préstamo al final de los 20 años de pago se muestran en la Tabla 4.58. Aquí se usa el mismo monto del préstamo tanto para la planta con inclinación como para la planta con seguimiento, por tener costos de inversión similares.

Tabla 4.58 Resultados relevantes del préstamo. Fuente: Elaboración propia.

Préstamo	Sin	Con y Seg
Interés	448.971.026	577.053.582
Amortización	666.537.942	856.688.036
Cuota	55.775.448	71.687.081
Monto total	1.115.508.968	1.433.741.618

Cabe destacar que el monto del interés es más de la mitad de la amortización, representando aproximadamente el 40% del monto total a pagar. se presentan los resultados del flujo de caja con los préstamos respectivos en la Tabla 4.59. se notan dos plantas que antes no eran rentables y que ahora sí, la del depósito El Mauro con paneles sin inclinación y la del depósito Laguna seca con inclinación. Conjuntamente la tabla presenta una singularidad en el depósito Ovejería con paneles con inclinación ya que representa una pérdida total de dinero, ya que la TIR es negativa.

Tabla 4.59 Resultados del flujo de caja cuando se integra un préstamo. Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Sin inclinación			Con Inclinación			Seguimiento Laguna S.
	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	Ovejería	El Mauro	Laguna S.	
TIR	1,7%	8,1%	20,6%	-2,2%	3,8%	11,4%	16,8%
VAN [\$MMCLP]	-105,1	1,8	284,9	-200,0	-95,7	89,2	396,9

## 5 Discusiones

Este estudio considera la gran mayoría de las mineras productoras de cobre del país, estas pertenecen a solo 10 dueños mayoritarios, por lo que basta con implementar el parque fotovoltaico en un depósito de relave para que se propague la idea y se pueda instalar en otros depósitos, entonces en términos de propaganda o difusión del proyecto no se tendría problema.

Se nota que existen bastantes depósitos de relaves a lo largo de la zona centro y norte de Chile, y la gran mayoría se encuentra entre la tercera y la cuarta región, donde además son buenos lugares para implementar plantas fotovoltaicas debido a la alta radiación solar y donde existen altos niveles de evaporación de agua.

En general todos los paneles fotovoltaicos deberían funcionar en plantas que usen flotadores, ya que estos están diseñados para trabajar a la intemperie, independiente del nivel de humedad o la cantidad de polvo circundante, pero para tener un nivel mayor de confiabilidad se usan paneles que han sido probados en flotadores sobre el agua, con esto se supone además que existe un grado de madurez de la tecnología implementada.

Dentro de los paneles usados en las PV flotantes se escoge el panel con mayor eficiencia, viendo su capacidad por hectárea y además se escoge el panel con menos eficiencia, debido a que este es más económico, luego observando la energía generada por precio, son más convenientes los paneles Yingli que los Ja Solar, ya que generan más energía si es que se invierte lo mismo para ambos paneles.

Los paneles Ja Solar toman un rol fundamental cuando se debe generar más energía en menos espacio, ya que este tiene mayor eficiencia que los paneles Yingli, en el caso del área ocupada en este estudio, los depósitos sobrepasan esta área de manera fácil, por lo que el espacio no es una limitante, de hecho, se escoge el tamaño de la planta a partir de los 10 depósitos con la mayor capacidad aprobada del país. Así pues, para mineras con depósitos de relaves menores los paneles Ja Solar pueden tomar valor adicional.

Los paneles fotovoltaicos que van directamente sobre el agua, son descartados por no existir plantas del tamaño que se estudia y por no poseer un sistema de mantenibilidad en planta ya probado, pero se destaca que es una buena idea para proyectos de baja escala, donde se puede desmontar el arreglo de paneles de manera fácil.

Las plantas PV flotantes con seguimiento no superan los 500 kWp de potencia, por lo que implementar un tamaño mayor significaría estar a la vanguardia, esto se considera un aspecto negativo en el ámbito técnico ya que no existe gran madurez de esta tecnología.

Pese a lo anterior, se escoge el sistema de seguimiento más confiable para el tamaño de planta deseado, considerando que los dos tipos de seguimiento analizados entregan un beneficio energético en torno a un 35%, el cual para ambos casos se pueden ir agrandando tanto como se desee. Al igual que las plantas puestas en tierra.

Existen diferencias notorias en ambos seguimientos estudiados y es que para tamaños de planta como el que se desea en este estudio, el seguimiento de base rotatoria con elementos octogonales, es el más indicado, ya que el otro considera unidades muy pequeñas de generación, por lo que para potencias de 1MW, se necesitan una vasta cantidad de estas. Los cuales no están conectados entre sí, de modo la mantención sobre de esta se hace más complicada.

Para el sistema de seguimiento escogido se tiene un riesgo de falla por la alta cantidad de polvo circundante en los depósitos de relave, pese a eso, se puede aumentar el periodo de las mantenciones para evitar que el motor se pare durante el día, aun así se considera que por la madurez de la tecnología y por la alta cantidad de polvo, se considera el sistema con seguimiento una opción riesgosa.

Los materiales usados en tuberías para la minería, en particular para transporte de relaves, son adecuados para el uso en depósitos, bajo esto mismo, se usa para el diseño de flotadores estas tuberías, de manera que se tenga certeza que funciona bajo las condiciones del relave, así mismo, se incluyen como materiales auxiliares el acero, madera, entre otros. Usar tuberías permite obtener materiales de los mismos proveedores de las mineras, el cual es un mercado amplio en el país.

Por temas de costo se decide utilizar la tubería de 200 mm de diámetro, por el contrario, el diseño de la estructura no es el más eficiente en términos económicos, ya que usa un par de tuberías por panel y otro par de tuberías por pasillo. Además, estas tuberías están diseñadas para transportar fluido, por lo que el espesor esta dimensionado para tales efectos.

Colocar los paneles con inclinación de manera longitudinal para disminuir el espacio entre paneles, solo sirve para disminuir la evaporación un poco más, ya que el área usada es la misma, pese a eso se prosigue con este formato para evaluar el sistema económicamente. Pero tiene una gran desventaja económica usar los paneles de esta forma, ya que se usa más tuberías que en el formato longitudinal, tal cual lo tienen los paneles sin inclinación.

Cabe destacar que el área ocupada para paneles sin inclinación es menor que para paneles con inclinación, ya que se consideran 20 arreglos por planta independiente de la energía generada, no obstante el área realmente tapada es mayor en los paneles sin inclinación, debido a que los paneles con inclinación deben ser separados para no provocar sombra en los otros paneles, pero esto no evita la evaporación en gran medida por lo que para efectos de disminución de la evaporación solo se considera el área tapada.

El aspecto de disminución de la evaporación, para el aumento de disponibilidad de agua en el depósito, tiene una importancia no valorizada en este estudio, la cual se refiere a las paradas de producción por falta de agua, por lo que disponer de más agua no solo presenta un beneficio en ahorro en el consumo, sino que también un aumento en la disponibilidad de agua para la producción, la valorización tiene que ser hecha a partir de información obtenida de directamente de las mineras, ya ellas tienen los datos necesarios para ello. Pero cabe destacar que según Cochilco se producen pérdidas de alrededor de 100 millones de pesos por solo horas de parar la producción en las plantas.

Tanto la producción de energía como la evaporación son eventos estacionarios, que tienen su máximo en el verano, así mismo el máximo de estas dos se produce en el depósito de Laguna Seca, esto es debido a que ambas dependen en gran medida de la radiación solar, es por eso que esta estacionalidad se condice con la estacionalidad de la radiación.

Como es esperable a medida que los depósitos están más hacia el norte la producción de energía y la evaporación es mayor, junto a esto los proyectos son más rentables en el norte, por otra parte, los precios son por productos que se encuentran en línea y no en algún lugar en particular, por lo que el precio final podría verse alterado por temas de despacho.

Productos como las tuberías y el equipamiento de fijación no considera economías de escala, por lo que el precio final podría bajar por este tipo de rebaja en el precio final, es por eso que se hace como análisis de sensibilidad para el proyecto cuando estos productos cuestan un cuarto menos.

Debido a la disposición de los paneles con inclinación el costo de las tuberías es casi el doble y el costo de las fijaciones es un tercio mayor, esto debido a que el formato en que se pusieron los paneles usa más tuberías y por ende más rieles. Además, en las fijaciones se tiene el soporte que da la inclinación a la estructura.

A modo de discusión, se consideran demasiados inversores por planta, es mucho más eficiente usar menos con más potencia disponible, pero no se recomienda usar solo uno, debido a que la mayor tasa de fallas se produce en estos, por lo que basta con que falle para que la planta se quede sin generación eléctrica. El diseño de la planta no varía mucho cuando se requieren arreglos más grandes, porque como toda planta fotovoltaica, estas son modulares, entonces solo se agregan paneles en fila o en paralelo como sea el caso.

Se debe considerar para la evaluación económica, como parte del presupuesto para el mantenimiento el repuesto de algunos productos de la planta, principalmente paneles e inversores, que son los que más fallan dentro de las plantas en Chile[10]. Además del repuesto que se tenga que hacer en el mantenimiento, se debe tener una bodega con aproximadamente 20 paneles como repuesto para toda la planta y un inversor extra.

Se compara el costo de producir los flotadores en función de cuánto cuestan los flotadores de Ciel et Terre, los cuales son líderes en instalaciones fotovoltaicas flotantes, esto es para tener una referencia con el precio de flotadores del mercado, y estos podrían llegar a costar entre un 33% hasta un 100% más. Cabe destacar que este aumento en el precio se debe a gran parte por un mal diseño de la planta, ya que estos flotadores están hechos de HDPE, material que también es trabajado en depósitos de relave, pero no se asegura el correcto funcionamiento de este sin la debida consulta a los proveedores existentes en Chile.

Según la opinión de expertos una tasa de rentabilidad de 8% es adecuada para la evaluación de los proyectos tanto para el cálculo del VAN como para poder comparar la TIR obtenida del flujo de caja, como resultado el proyecto es rentable solo para el depósito de Laguna Seca, en el formato de sin inclinación y con seguimiento, donde en ambos casos se recupera la inversión inicial en 9 años.

La otra planta que obtiene mayor TIR es la de Laguna Seca con inclinación, la cual no está por sobre los 6,5%, pero con esto se puede observar la importancia de la generación de energía en la rentabilidad que las plantas poseen, debido a que las mayores TIR son obtenidas en las plantas con mayores ingresos por energía.

Cabe destacar aun así que la planta sin inclinación que no usa el tipo de paneles más eficiente y que no aprovecha toda la energía disponible del sol, es casi igual de rentable que la planta con seguimiento. Esto principalmente es porque la planta con seguimiento es bastante más cara que la planta sin inclinación, con aproximadamente un 50% más cara.

Se puede decir que es más conveniente la opción sin inclinación, ya que la planta con seguimiento presenta demasiadas uniones de tuberías, además presenta un seguimiento con motor y con el carril expuesto, considerando la cantidad de polvo circundante en los depósitos es posible que la tasa de fallas aumente en estos casos.

Como se dijo anteriormente, el proyecto es bastante sensible a los cambios en el precio de la energía, lo que provoca que cuando se aumenta en un 25% el precio de la energía, dos nuevas plantas se hagan rentables, la del depósito Laguna Seca con inclinación, y además la planta en el depósito El Mauro, las otras dos plantas que ya eran rentables, mejoran su VAN y TIR haciéndolas aún más rentables.

Por otra parte, basta con reducir el precio de la energía en un 13% para que el proyecto con seguimiento ya no sea rentable, aun así, el de Laguna Seca sin inclinación queda con una TIR de 8%, pero con un VAN positivo de aproximadamente 0,8 millones de pesos, lo cual deja este proyecto como rentable.

Bajo este mismo punto cabe señalar la dependencia de las plantas al precio de la energía, es mayor en la planta con seguimiento que en las plantas sin inclinación, ya que la planta con seguimiento paso de ser más rentable en el caso del proyecto puro a no ser rentable, mientras la planta sin inclinación solo bajo su rentabilidad, pese a eso aún sigue siendo rentable.

La economía de escala en la compra de tuberías y elementos de fijación, se supone que podría rebajar un 25% el costo de los flotadores, a partir de esto se logra aumentar la rentabilidad de los proyectos que son rentables en el proyecto puro y además logra ser rentable la planta de Laguna seca con inclinación.

Esta planta de laguna seca con inclinación también se logra rentable cuando se cambia la disposición de los paneles de longitudinal a perpendicular, tal cual se colocan en los paneles sin inclinación, lo cual genera que el proyecto de laguna seca con inclinación sea rentable, y este genera una rentabilidad mayor que la disminución de precio, por lo que no tiene sentido mantener la disposición anterior, ya que de esta forma el proyecto logra ser conveniente invertir en él.

Cuando se supone la instalación de los flotadores Ciel et Terre, reduciendo el costo de instalación de los flotadores, se logra que las plantas de Laguna Seca sean rentables. Considerando la generación de energía de la planta sin inclinación se obtiene una mayor TIR que la generación de energía con inclinación, esto se debe a que los paneles usados en la planta sin inclinación son más eficientes económicamente que el otro panel.

El proyecto financiado, logra que las tres plantas del depósito Laguna Seca sean rentables, con una TIR sobre el 10% en los tres casos, y además consigue que la planta sin inclinación sea rentable para el depósito El Mauro, esto indica que es mucho más conveniente económicamente realizar la inversión a través de un préstamo.

## 6 Conclusiones

El problema existente en las mineras del norte de Chile en el ámbito energético e hídrico puede ser solucionado en conjunto con el parque fotovoltaico flotante propuesto, es decir, mediante flotadores hechos por tuberías de PVC, con paneles fotovoltaicos puestos sin inclinación sobre estas tuberías, con esto se podría obtener la energía más barata y además se aumentaría la disponibilidad de agua en el depósito lo que provoca poder recircular aún más agua de él.

Bajo cualquier caso, se recomienda instalar plantas de 3 MW ya que a medida que es mayor el tamaño, menores es la inversión en proporción a la potencia y los costos de mantención también disminuyen, asimismo bajo esta potencia no se realiza la evaluación de impacto ambiental. Sobre esta potencia se debe considerar lo anterior, aun así, hasta los 9MW se evita el pago de peajes por transmisión de energía, lo que permite la conexión de manera más económica.

Dentro de los paneles existentes, los más usados en los parques fotovoltaicos flotantes al igual que en las plantas terrestres son los monocristalinos y policristalinos, los cuales ambos son usados para la evaluación de este estudio, pese a esto, la selección de ambos solo pasa por la eficiencia que se obtiene de estos paneles, en la cual, con los paneles Yingli se obtiene la menor eficiencia que conlleva un menor precio y por el contrario se escogen los paneles Ja Solar que ofrecen una gran eficiencia energética.

Para los depósitos escogidos es más conveniente usar los paneles Yingli, ya que se obtiene mejor evaluación económica y no se tiene una restricción de espacio. Por otra parte, si se evalúa instalar los paneles en depósitos de relave con una laguna de menor área, según los requerimientos energéticos, se podría llegar a considerar la instalación de paneles más eficientes como los Ja Solar.

En cuanto a la materialidad de los flotadores, es un tema bastante tratado en el ámbito minero, ya que existen flotadores y diversos materiales que están en contacto con el relave, es decir, en temas de materialidad basta con seleccionar algunos ya usados. Recapitulando se puede usar PVC, HDPE, PP, acero, aluminio y algunas maderas.

Sobre la forma del flotador es donde se tiene una mayor discusión, pese a que se consigue un proyecto rentable en la zona norte del país, en la zona centro se obtienen índices de rentabilidad bastante bajos, gran parte de esto es causado por el diseño del flotador, el cual no logra tener un costo menor que los flotadores de Ciel et Terre, por lo que no tiene sentido diseñar un flotador si se logra obtener uno en el mercado ya probado y más barato.

Así pues, la disposición de los paneles también influye en el costo de los flotadores, con el afán de usar menos espacio entre filas, con los paneles más eficientes, se llega a una solución donde se emplea más metros de tuberías, lo que conlleva a un mayor precio del flotador, este precio extra no es ahorrado de ninguna forma ya que se supone que el terreno no considera un costo en la inversión, y el tamaño del depósito es suficientemente grande como para instalar la potencia estudiada.

Se considera que el diseño de los flotadores no es el más óptimo, ya que se esperaba que fuera más económico que el entregado por Ciel et Terre, aun así, con este diseño se obtienen resultados positivos para depósitos ubicados en el norte como es el caso del depósito Laguna Seca. Pero considerando que los flotadores ofrecidos por Ciel et Terre han sido probados en diversas plantas a nivel mundial, y que este sea de HDPE, material inerte ante sustancias químicas y altamente usado en la industria minera, entonces es posible instalar estos en el depósito de relave.

Se realizan tres configuraciones de flotadores distintas con dos paneles asociados, dentro de las cuales la mejor evaluada en términos técnicos y económicos es la de sin inclinación, en términos económicos

se puede descartar la opción con inclinación debido al mal diseño de este, quedando solo la opción de paneles sin inclinación y con seguimiento. Ahora si se concluye a partir del análisis técnico, se puede decir que la mejor opción es usar los paneles Yingli con inclinación, con la disposición que tienen los paneles sin inclinación. El seguimiento es una opción riesgosa, como se indicó anteriormente, por la cantidad de polvo circundante en los depósitos.

Se considero una vida útil para los inversores y para los paneles demasiado extensa como para lo que se ha dado en Chile, pese a que en Chile la planta con seguimiento más antigua solo tiene 5 años, algunas de estas ya presentan problemas técnicos.

El flujo de caja del proyecto puro, es decir sin financiación, entrega una TIR de aproximadamente 9,6% tanto para la planta sin inclinación como para la planta con seguimiento en el depósito de Laguna Seca, con un VAN de 116 millones de pesos para la planta sin inclinación y de 18 millones para la planta con seguimiento, en ambos casos se recupera la inversión en 9 años, pese a que el retorno es alto para la tasa de rentabilidad como la dada, es bastante aceptable para proyectos fotovoltaicos.

Luego el mismo escenario con financiación, entrega resultados bastante más favorables para los casos que ya eran rentables, con una TIR de 20,6% para la planta sin inclinación de Laguna Seca y para la planta con seguimiento una TIR de 16,8%. Por otra parte, con un crédito comienza a ser rentables las plantas que tienen su tasa de rentabilidad con proyecto puro más alto que la tasa de interés dada por el crédito. Estos son la planta sin inclinación de El Mauro con un 8,1% de TIR, y el depósito de Laguna Seca con paneles inclinados con 11,4% de TIR.

A través del análisis de sensibilidad se nota la importancia que tiene el precio de la energía en la rentabilidad del proyecto, esto indica que es conveniente hacer algún contrato de venta de energía con la empresa minera para no depender del precio nudo de corto plazo impuesto por el mercado. Por otra parte, se decide hacer casos positivos en el análisis de costos, ya que los costos de los productos son considerados altos debido a que se consultaron sin una economía de escala.

Obteniendo un escenario favorable en el costo de los flotadores, siempre se mejora la rentabilidad de las plantas de Laguna Seca con seguimiento y la de sin inclinación, y en todos los casos analizados se vuelve favorable la planta con inclinación de Laguna Seca.

Para concluir, el proyecto de colocar paneles fotovoltaicos flotantes es técnicamente factible instalarlo en depósitos que solo contengan relave producto de la flotación de cobre, se recomienda para el diseño materiales que se usan actualmente en depósitos, las tuberías usadas en minería se ofrecen como una opción para construir los flotadores, pero también se debe considerar estudiar la posibilidad de fabricar flotadores manufacturados.

En términos económicos, el proyecto es factible en el norte de Chile, donde los indicadores demuestran que es rentable, aun así, este es sensible a las variaciones en el precio de la energía, y es ahí donde el precio del panel toma un papel importante y muestra que este en función de la energía generada es una variable a considerar cuando no se tiene un máximo de superficie.

Este estudio se limita al análisis mediante el diseño de flotadores con materiales encontrados en el mercado y no con la manufacturación de estos. Se propone que se estudie un diseño de un flotador que se pueda manufacturar o que se evalúe económicamente con algún flotador ya diseñado en la industria chilena modificando este lo suficiente como para poder instalar los paneles solares.

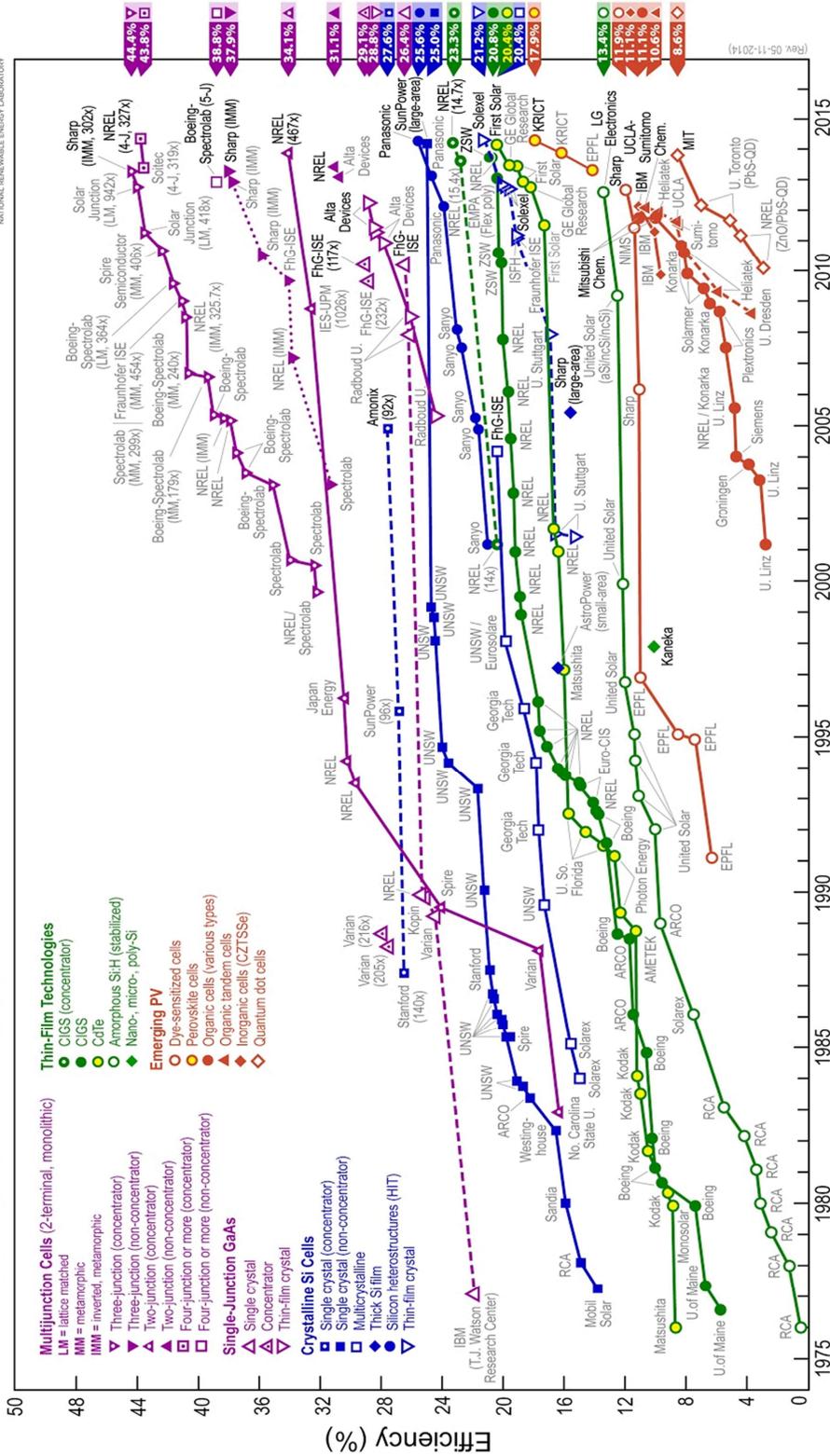
## 7 Bibliografía

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st century, Energías renovables 2016, reporte de la situación actual., REN21, 2016.
- [2] BP Global, Statistical Review of World Energy June 2016, British Petroleum Global, 2016.
- [3] UN-Water, «The United Nations World Water Development Report 2012», United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Place de Fontenay, Francia, 2012.
- [4] Servicio Nacional de Geología y Minería, «CATASTRO DE DEPÓSITOS DE RELAVES», Departamento de Seguridad Minera, Santiago, 2010.
- [5] C. I., «Controlling Evaporation Loss from Water Storages», National Centre for Engineering in Agriculture Publication 1000580/1, USQ, Toowoomba, 2005.
- [6] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Instalaciones de Energía Solar Térmica: Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura», (IDAE), Madrid, 2009.
- [7] Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica de Chile, «Evaluación de la División Político Administrativa vigente», Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, Santiago, 2007.
- [8] K. Trapani, «The thin film flexible floating PV (T3F-PV) array: The concept and development of the prototype», Elsevier, Ontario, Canada, 2014.
- [9] Y.-K. Choi, «A study on major design elements of tracking-type floating photovoltaic systems», International Journal of Smart Grid and Clean Energy, Republic of Korea, 2013.
- [10] Encare y Energía 360, «Estudio Benchmarking de plantas solares fotovoltaicas en Chile», Programa Energía solar, Santiago, 2017.
- [11] S.-H. Kim, «Application of Floating Photovoltaic Energy Generation Systems in South Korea», Sustainability, South Korea, 2016.

- [12] Y.-K. C. Lee, «A Study on Development of Rotary Structure for Tracking-Type Floating Photovoltaic System,» INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, South Korea, 2014.
- [13] A. Pronk, «Sun-Spotter : gravity point displacement as solar-tracking principle,» IASS Symposium, Amsterdam, 2015.
- [14] D. Dizdar, «Sun-Spotter floating solar-tracking spotlight,» Technische Universiteit Eindhoven, University of Technology, Eindhoven, 2015.
- [15] C. Santana, «Generación Distribuida: Avances y oportunidades,» de *Ministerio de Energía, División Energías Renovables*, Santiago, 2017.
- [16] D. C. Sepúlveda, «Análisis del modelo del balance de aguas del tranque de relaves laguna seca y de su impacto económico en los procesos de minera escondida limitada,» Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 2012.
- [17] F. G. Urrutia, «Modelo del balance hídrico del tranque de relaves ovejería,» Universidad de Chile, Santiago, 2007.
- [18] M. S. Redón, «Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs,» Elsevier, Valencia, 2013-b.

## **Anexo A**

# Best Research-Cell Efficiencies

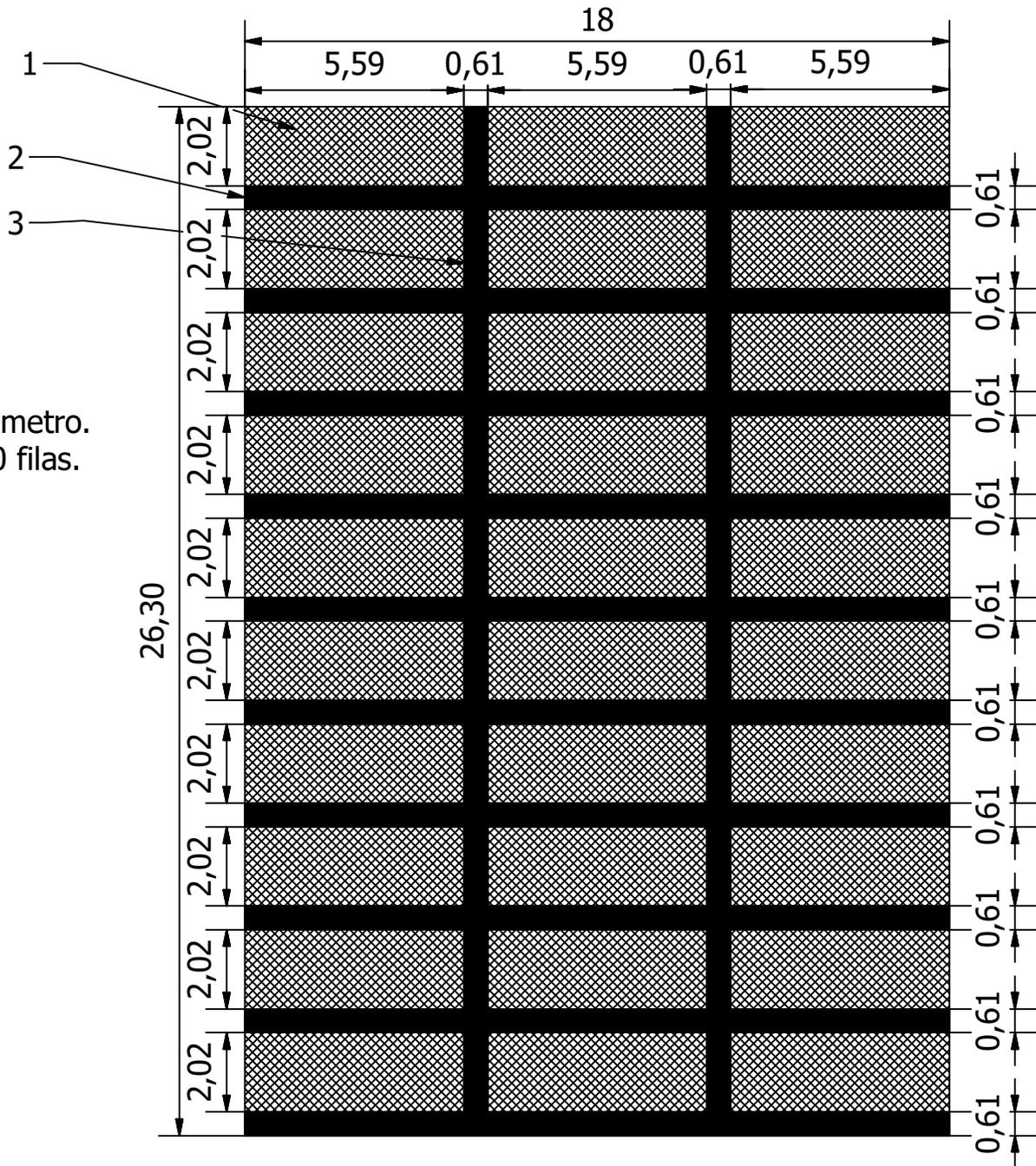


(Rev: 05-11-2014)

Eficiencia de las celdas fotovoltaicas. Fuente: National Renewable Energy Laboratory

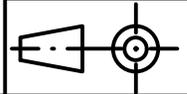
## **Anexo B**

Unidades en metro.  
Arreglo de 10 filas.

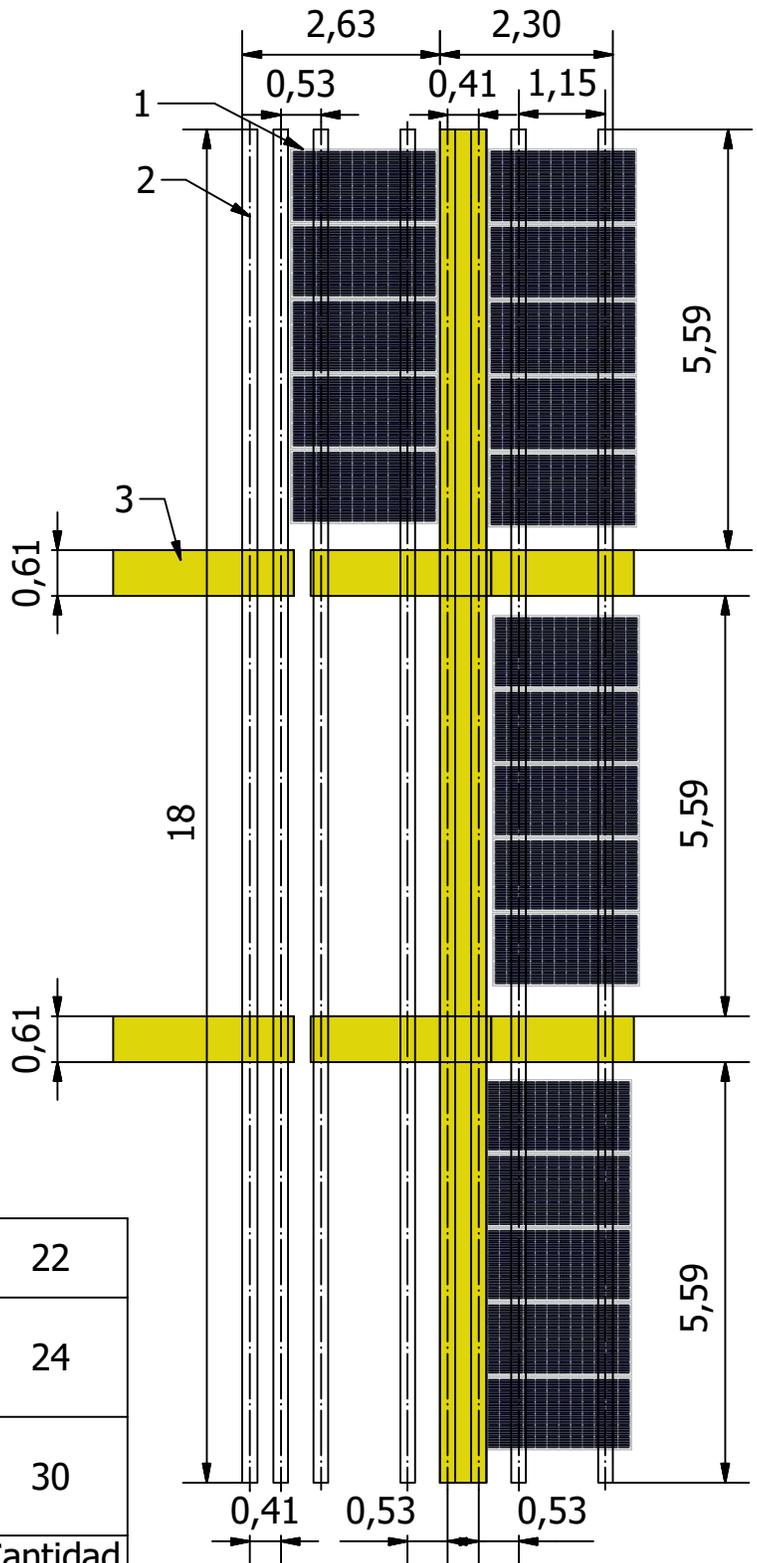


3	Pasillo vertical	Pasillo vertical compuesto por tablas	2
2	Pasillo horizontal	Pasillo horizontal compuesto por tablas	10
1	Paneles	5 modulos fotovoltaicos Yingli	30
Ítem	Elemento	Descripción	Cantidad

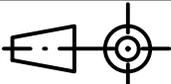
Fecha		Nombre			
Dibujado		Víctor Arroyo			
Revisado					
Proyecto: Parque fotovoltaico flotante				<b>fcfm</b> FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE	
Escala: 1:6		Título:			Plano N°:
Formato: A4		Arreglo horizontal			1



Unidades en metros  
 2 filas de un arreglo de  
 10 filas en total.  
 Las filas se van  
 sumando a la izquierda  
 de la figura



Ítem	Elemento	Descripción	Cantidad
3	Pasillo	Madera de 0,61x2,44m	22
2	Tuberia	PVC 315 mm L=6 metros	24
1	Panel	Modulo fotovoltaico Yingli	30

Fecha	Nombre
Dibujado 11-07-2017	Víctor Arroyo
Revisado	
Proyecto: Parque fotovoltaico flotante	
Escala: 1:100	Título: 2 String de Arreglo horizontal
Formato: A4	
	

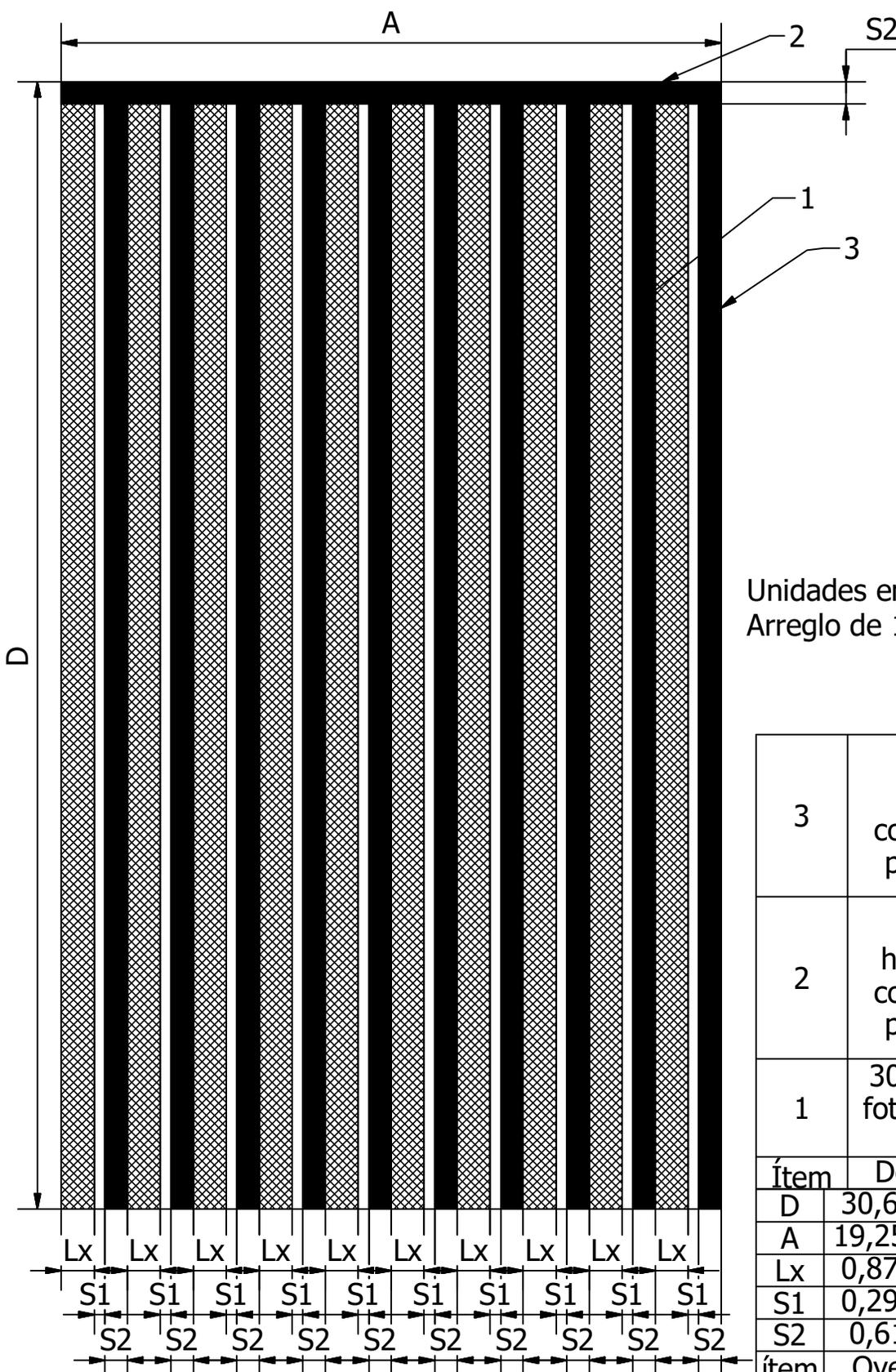


**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
 UNIVERSIDAD DE CHILE

Plano N°:

2



Unidades en metro.  
Arreglo de 10 filas.

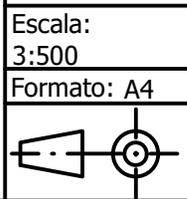
3	Pasillo vertical compuesto por tablas	10
2	Pasillo horizontal compuesto por tablas	1
1	30 modulos fotovoltaicos Ja Solar	10
Ítem	Descripción	Total
D	30,61	30,61
A	19,251	18,591
Lx	0,875	0,883
S1	0,294	0,228
S2	0,61	0,61
ítem	Ove	Mau
		Lag

	Fecha	Nombre
Dibujado	11-07-2017	Víctor Arroyo
Revisado		
Proyecto:	Parque fotovoltaico flotante	



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



Escala: 3:500 Formato: A4	Título:  Arreglo inclinado
---------------------------------	----------------------------------

Plano N°:  3
--------------------

## **Anexo C**

**Parque fotovoltaico flotante  
Ovejería sin inclinación  
FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

ITEM / AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Producción energía	0	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920
Reducción de evap de agua	0	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365
<b>INGRESOS TOTALES (CLP\$)</b>	0	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285
Costos Fijos		-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491
Depreciación	0	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156
<b>EGRESOS TOTALES</b>	0	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO</b>	0	23.552.638	23.552.638	23.552.638	23.552.638	23.552.638	23.552.638	23.552.638	23.552.638
Impuesto a las Utilidades (19%)	0	4.475.001	4.475.001	4.475.001	4.475.001	4.475.001	4.475.001	4.475.001	4.475.001
Utilidad Después de Impuesto	0	19.077.637	19.077.637	19.077.637	19.077.637	19.077.637	19.077.637	19.077.637	19.077.637
Más Depreciación	0	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156
<b>INVERSIONES PARA:</b>									
- Construcción	-293.422.500								
- Inversión	-658.774.560								
<b>RECUPERACION DE LA INVERSION</b>	-952.197.060	-879.515.267	-806.833.475	-734.151.682	-661.469.890	-588.788.097	-516.106.305	-443.424.512	-370.742.720
<b>FLUJO NETO CAJA</b>	-952.197.060	72.681.792	72.681.792	72.681.792	72.681.792	72.681.792	72.681.792	72.681.792	72.681.792
<b>RESULTADOS</b>									
T.I.R.	3,9%								
V.A.N. (8%)	-263.003.723								
PAYBACK (año)	14								

**Parque fotovoltaico flotante  
Ovejera sin inclinación**

**(Continuación) FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920	86.042.920
	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365	4.289.365
	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285	90.332.285
	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491
	-53.604.156	-53.604.156	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300
	-66.779.647	-66.779.647	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791
	23.552.638	23.552.638	64.883.494	64.883.494	64.883.494	64.883.494	64.883.494	64.883.494	64.883.494	64.883.494	64.883.494	64.883.494
	4.475.001	4.475.001	12.327.864	12.327.864	12.327.864	12.327.864	12.327.864	12.327.864	12.327.864	12.327.864	12.327.864	12.327.864
	19.077.637	19.077.637	52.555.630	52.555.630	52.555.630	52.555.630	52.555.630	52.555.630	52.555.630	52.555.630	52.555.630	52.555.630
	53.604.156	53.604.156	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300
							0					
	-298.060.927	-225.379.135	-160.550.205	-95.721.275	-30.892.345	33.936.584	98.765.514	163.594.444	228.423.374	293.252.304	358.081.234	422.910.163
	72.681.792	72.681.792	64.828.930	64.828.930	64.828.930	64.828.930	64.828.930	64.828.930	64.828.930	64.828.930	64.828.930	64.828.930

**Parque fotovoltaico flotante  
El Mauro sin inclinación  
FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

ITEM / AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Producción energía	0	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040
Reducción de evap de agua	0	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667
<b>INGRESOS TOTALES (CLP\$)</b>	0	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707
Costos Fijos		-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491
Depreciación	0	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156	-53.604.156
<b>EGRESOS TOTALES</b>	0	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647	-66.779.647
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO</b>	0	35.669.060	35.669.060	35.669.060	35.669.060	35.669.060	35.669.060	35.669.060	35.669.060
Impuesto a las Utilidades (19%)	0	6.777.121	6.777.121	6.777.121	6.777.121	6.777.121	6.777.121	6.777.121	6.777.121
Utilidad Después de Impuesto	0	28.891.939	28.891.939	28.891.939	28.891.939	28.891.939	28.891.939	28.891.939	28.891.939
Más Depreciación	0	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156	53.604.156
<b>INVERSIONES PARA:</b>									
- Construcción	-293.422.500								
- Inversión	-658.774.560								
<b>RECUPERACION DE LA INVERSION</b>	-952.197.060	-869.700.965	-787.204.870	-704.708.776	-622.212.681	-539.716.587	-457.220.492	-374.724.398	-292.228.303
<b>FLUJO NETO CAJA</b>	-952.197.060	82.496.095	82.496.095	82.496.095	82.496.095	82.496.095	82.496.095	82.496.095	82.496.095
<b>RESULTADOS</b>									
T.I.R.	5,5%								
V.A.N. (8%)	-166.645.459								
PAYBACK (año)	12								

**Parque fotovoltaico flotante  
El Mauro sin inclinación**

**(Continuación) FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040	90.660.040
11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667	11.788.667
102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707	102.448.707
-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491
-53.604.156	-53.604.156	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300
-66.779.647	-66.779.647	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791
35.669.060	35.669.060	76.999.916	76.999.916	76.999.916	76.999.916	76.999.916	76.999.916	76.999.916	76.999.916	76.999.916	76.999.916
6.777.121	6.777.121	14.629.984	14.629.984	14.629.984	14.629.984	14.629.984	14.629.984	14.629.984	14.629.984	14.629.984	14.629.984
28.891.939	28.891.939	62.369.932	62.369.932	62.369.932	62.369.932	62.369.932	62.369.932	62.369.932	62.369.932	62.369.932	62.369.932
53.604.156	53.604.156	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300
							0				
<b>-209.732.209</b>	<b>-127.236.114</b>	<b>-52.592.883</b>	<b>22.050.349</b>	<b>96.693.561</b>	<b>171.336.813</b>	<b>245.980.045</b>	<b>320.623.277</b>	<b>395.266.509</b>	<b>469.909.740</b>	<b>544.552.972</b>	<b>619.196.204</b>
<b>82.496.095</b>	<b>82.496.095</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>	<b>74.643.232</b>



**Parque fotovoltaico flotante  
Laguna Seca sin inclinación**

**(Continuación) FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535	111.650.535
26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407	26.372.407
138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943	138.022.943
-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491	-13.175.491
-53.604.156	-53.604.156	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300	-12.273.300
-66.779.647	-66.779.647	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791	-25.448.791
71.243.295	71.243.295	112.574.151	112.574.151	112.574.151	112.574.151	112.574.151	112.574.151	112.574.151	112.574.151	112.574.151	112.574.151
13.536.226	13.536.226	21.389.089	21.389.089	21.389.089	21.389.089	21.389.089	21.389.089	21.389.089	21.389.089	21.389.089	21.389.089
57.707.069	57.707.069	91.185.063	91.185.063	91.185.063	91.185.063	91.185.063	91.185.063	91.185.063	91.185.063	91.185.063	91.185.063
53.604.156	53.604.156	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300	12.273.300
							0				
<b>49.603.967</b>	<b>160.915.193</b>	<b>264.373.555</b>	<b>367.831.918</b>	<b>471.290.280</b>	<b>574.748.643</b>	<b>678.207.006</b>	<b>781.665.368</b>	<b>885.123.731</b>	<b>988.582.093</b>	<b>1.092.040.456</b>	<b>1.195.498.819</b>
<b>111.311.225</b>	<b>111.311.225</b>	<b>103.458.363</b>	<b>103.458.363</b>								



**Parque fotovoltaico flotante  
Ovejera con inclinación**

**(Continuación) FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181	106.143.181
	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308	3.573.308
	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489	109.716.489
	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151
	-69.108.215	-69.108.215	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540
	-86.971.366	-86.971.366	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691
	22.745.123	22.745.123	71.645.798	71.645.798	71.645.798	71.645.798	71.645.798	71.645.798	71.645.798	71.645.798	71.645.798	71.645.798
	4.321.573	4.321.573	13.612.702	13.612.702	13.612.702	13.612.702	13.612.702	13.612.702	13.612.702	13.612.702	13.612.702	13.612.702
	18.423.550	18.423.550	58.033.097	58.033.097	58.033.097	58.033.097	58.033.097	58.033.097	58.033.097	58.033.097	58.033.097	58.033.097
	69.108.215	69.108.215	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540
								0				
	-436.054.166	-348.522.402	-270.281.765	-192.041.128	-113.800.491	-35.559.855	42.680.782	120.921.419	199.162.055	277.402.692	355.643.329	433.883.966
	87.531.765	87.531.765	78.240.637	78.240.637	78.240.637	78.240.637	78.240.637	78.240.637	78.240.637	78.240.637	78.240.637	78.240.637

**Parque fotovoltaico flotante  
El Mauro con inclinación**

**FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

ITEM / AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Producción energía	0	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393
Reducción de evap de agua	0	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607
<b>INGRESOS TOTALES (CLP\$)</b>	0	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000
Costos Fijos		-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151
Depreciación	0	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215
<b>EGRESOS TOTALES</b>	0	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO</b>	0	34.072.634	34.072.634	34.072.634	34.072.634	34.072.634	34.072.634	34.072.634	34.072.634
Impuesto a las Utilidades (19%)	0	6.473.800	6.473.800	6.473.800	6.473.800	6.473.800	6.473.800	6.473.800	6.473.800
Utilidad Después de Impuesto	0	27.598.834	27.598.834	27.598.834	27.598.834	27.598.834	27.598.834	27.598.834	27.598.834
Más Depreciación	0	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215
<b>INVERSIONES PARA:</b>									
- Construcción	-330.662.500								
- Inversión	-693.157.551								
<b>RECUPERACION DE LA INVERSION</b>	-1.223.840.051	-1.127.133.003	-1.030.425.954	-933.718.905	-837.011.856	-740.304.807	-643.597.759	-546.890.710	-450.183.661
<b>FLUJO NETO CAJA</b>	-1.223.840.051	96.707.049	96.707.049	96.707.049	96.707.049	96.707.049	96.707.049	96.707.049	96.707.049
<b>RESULTADOS</b>									
T.I.R.	4,4%								
V.A.N. (8%)	-303.233.431								
PAYBACK (año)	13								

**Parque fotovoltaico flotante  
El Mauro con inclinación**

**(Continuación) FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393	111.180.393
9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607	9.863.607
121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000	121.044.000
-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151
-69.108.215	-69.108.215	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540
-86.971.366	-86.971.366	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691
34.072.634	34.072.634	82.973.309	82.973.309	82.973.309	82.973.309	82.973.309	82.973.309	82.973.309	82.973.309	82.973.309	82.973.309
6.473.800	6.473.800	15.764.929	15.764.929	15.764.929	15.764.929	15.764.929	15.764.929	15.764.929	15.764.929	15.764.929	15.764.929
27.598.834	27.598.834	67.208.381	67.208.381	67.208.381	67.208.381	67.208.381	67.208.381	67.208.381	67.208.381	67.208.381	67.208.381
69.108.215	69.108.215	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540
							0				
-353.476.612	-256.769.563	-169.353.643	-81.937.722	5.478.198	92.894.119	180.310.039	267.725.960	355.141.880	442.557.801	529.973.721	617.389.642
96.707.049	96.707.049	87.415.921	87.415.921	87.415.921	87.415.921	87.415.921	87.415.921	87.415.921	87.415.921	87.415.921	87.415.921

**Parque fotovoltaico flotante  
Laguna Seca con inclinación**

**FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

ITEM / AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Producción energía	0	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168
Reducción de evap de agua	0	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916
<b>INGRESOS TOTALES (CLP\$)</b>	0	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084
Costos Fijos	0	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151
Depreciación	0	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215	-69.108.215
<b>EGRESOS TOTALES</b>	0	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366	-86.971.366
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO</b>	0	56.163.718	56.163.718	56.163.718	56.163.718	56.163.718	56.163.718	56.163.718	56.163.718
Impuesto a las Utilidades (19%)	0	10.671.106	10.671.106	10.671.106	10.671.106	10.671.106	10.671.106	10.671.106	10.671.106
Utilidad Después de Impuesto	0	45.492.611	45.492.611	45.492.611	45.492.611	45.492.611	45.492.611	45.492.611	45.492.611
Más Depreciación	0	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215	69.108.215
<b>INVERSIONES PARA:</b>									
- Construcción		-330.662.500							
- Inversión		-893.157.551							
<b>RECUPERACION DE LA INVERSION</b>		-1.223.840.051	-1.109.239.225	-880.037.572	-765.436.746	-650.835.919	-536.235.093	-421.634.267	-307.033.440
<b>FLUJO NETO CAJA</b>		-1.223.840.051	114.600.826	114.600.826	114.600.826	114.600.826	114.600.826	114.600.826	114.600.826
<b>RESULTADOS</b>									
T.I.R.		6,5%							
V.A.N. (8%)		-127.549.685							
PAYBACK (año)		11							

**Parque fotovoltaico flotante  
Laguna Seca con inclinación**

**(Continuación) FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168	120.810.168
22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916	22.324.916
143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084	143.135.084
-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151	-17.863.151
-69.108.215	-69.108.215	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540	-20.207.540
-86.971.366	-86.971.366	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691	-38.070.691
56.163.718	56.163.718	105.064.393	105.064.393	105.064.393	105.064.393	105.064.393	105.064.393	105.064.393	105.064.393	105.064.393	105.064.393
10.671.106	10.671.106	19.962.235	19.962.235	19.962.235	19.962.235	19.962.235	19.962.235	19.962.235	19.962.235	19.962.235	19.962.235
45.492.611	45.492.611	85.102.158	85.102.158	85.102.158	85.102.158	85.102.158	85.102.158	85.102.158	85.102.158	85.102.158	85.102.158
69.108.215	69.108.215	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540	20.207.540
							0				
<b>-192.432.614</b>	<b>-77.831.788</b>	<b>27.477.911</b>	<b>132.787.609</b>	<b>238.097.307</b>	<b>343.407.005</b>	<b>448.716.703</b>	<b>554.026.401</b>	<b>659.336.099</b>	<b>764.645.797</b>	<b>869.955.495</b>	<b>975.265.194</b>
<b>114.600.826</b>	<b>114.600.826</b>	<b>105.309.698</b>									

**Parque fotovoltaico flotante  
Laguna Seca con seguimiento  
FLUJO DE CAJA DE LA SITUACIÓN CON PROYECTO (CLP\$/AÑO)**

ITEM / AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Producción energía	0	188.291.159	188.291.159	188.291.159	188.291.159	188.291.159	188.291.159	188.291.159	188.291.159
Reducción de evap de agua	0	21.491.112	21.491.112	21.491.112	21.491.112	21.491.112	21.491.112	21.491.112	21.491.112
<b>INGRESOS TOTALES (CLP\$)</b>	0	209.782.272	209.782.272	209.782.272	209.782.272	209.782.272	209.782.272	209.782.272	209.782.272
Costos Fijos		-23.242.527	-23.242.527	-23.242.527	-23.242.527	-23.242.527	-23.242.527	-23.242.527	-23.242.527
Depreciación	0	-79.969.573	-79.969.573	-79.969.573	-79.969.573	-79.969.573	-79.969.573	-79.969.573	-79.969.573
<b>EGRESOS TOTALES</b>	0	-103.212.101	-103.212.101	-103.212.101	-103.212.101	-103.212.101	-103.212.101	-103.212.101	-103.212.101
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO</b>	0	106.570.171	106.570.171	106.570.171	106.570.171	106.570.171	106.570.171	106.570.171	106.570.171
Impuesto a las Utilidades (19%)	0	20.248.332	20.248.332	20.248.332	20.248.332	20.248.332	20.248.332	20.248.332	20.248.332
Utilidad Después de Impuesto	0	86.321.838	86.321.838	86.321.838	86.321.838	86.321.838	86.321.838	86.321.838	86.321.838
Más Depreciación	0	79.969.573	79.969.573	79.969.573	79.969.573	79.969.573	79.969.573	79.969.573	79.969.573
<b>INVERSIONES PARA:</b>									
- Construcción			-264.546.000						
- Inversión			-1.162.126.372						
<b>RECUPERACION DE LA INVERSION</b>		-1.260.380.961	-1.094.089.549	-927.798.137	-761.506.725	-595.215.314	-428.923.902	-262.632.490	-96.341.079
<b>FLUJO NETO CAJA</b>		166.291.412	166.291.412	166.291.412	166.291.412	166.291.412	166.291.412	166.291.412	166.291.412
<b>RESULTADOS</b>									
T.I.R.									
V.A.N. (8%)									
PAYBACK (año)									
									9
									9,7%
									180.179.294



## **Anexo D**

Año de operación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Año	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
<b>Préstamo para paneles sin inclinación</b>												
Interes	36.659.587	35.608.214	34.499.017	33.328.813	32.094.248	30.791.782	29.417.680	27.968.003	26.438.593	24.825.066	23.122.795	21.326.899
Amortización	19.115.862	20.167.234	21.276.432	22.446.636	23.681.201	24.983.667	26.357.768	27.807.446	29.336.855	30.950.382	32.652.653	34.448.549
<b>Total Cuota</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>	<b>55.775.448</b>
<b>Acumulado</b>	55.775.448	111.550.897	167.326.345	223.101.794	278.877.242	334.652.690	390.428.139	446.203.587	501.979.036	557.754.484	613.529.932	669.305.381
<b>Préstamo para paneles con inclinación y con seguimiento.</b>												
Interes	47.117.842	45.766.534	44.340.904	42.836.864	41.250.102	39.576.068	37.809.963	35.946.721	33.981.001	31.907.167	29.719.272	27.411.042
Amortización	24.569.239	25.920.547	27.346.177	28.850.217	30.436.979	32.111.013	33.877.118	35.740.360	37.706.080	39.779.914	41.967.809	44.276.039
<b>Total Cuota</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>	<b>71.687.081</b>
<b>Acumulado</b>	71.687.081	143.374.162	215.061.243	286.748.324	358.435.404	430.122.485	501.809.566	573.496.647	645.183.728	716.870.809	788.557.890	860.244.971
Tasa	5,50%											
Años	20											
Monto	952.197.060	70%	666.537.942	Sin inclinación								
Monto	1.223.840.051	70%	856.688.036	Con inclinación y con seguimiento								

Préstamo	Sin	Con y Seg
Interes	448.971.026	577.053.582
Amortización	666.537.942	856.688.036
Cuota	55.775.448	71.687.081
Monto total	1.115.508.968	1.433.741.618

Año de operación	13	14	15	16	17	18	19	20
Año	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037 Total
<b>(Continuación) Prestamo para paneles sin inclinación.</b>								
Interes	19.432.229	17.433.352	15.324.537	13.099.737	10.752.573	8.276.314	5.663.862	448.971.026
Amortización	36.343.219	38.342.096	40.450.912	42.675.712	45.022.876	47.499.134	50.111.586	666.537.942
<b>Total Cuota</b>	<b>55.775.448</b>	<b>1.115.508.968</b>						
<b>Acumulado</b>	725.080.829	780.856.278	836.631.726	892.407.174	948.182.623	1.003.958.071	1.059.733.520	1.115.508.968
<b>(Continuación) Prestamo para paneles con inclinación y con seguimiento.</b>								
Interes	24.975.860	22.406.743	19.696.324	16.836.833	13.820.069	10.637.383	7.279.650	577.053.582
Amortización	46.711.221	49.280.338	51.990.757	54.850.248	57.867.012	61.049.698	64.407.431	856.688.036
<b>Total Cuota</b>	<b>71.687.081</b>	<b>1.433.741.618</b>						
<b>Acumulado</b>	931.932.052	1.003.619.133	1.075.306.213	1.146.993.294	1.218.680.375	1.290.367.456	1.362.054.537	1.433.741.618