

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BELGICA

**DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO SOLAR OFF GRID PARA
PEQUEÑOS AGRICULTORES DE LA COMUNIDAD
ATACAMEÑA DE PEINE, REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Técnico Universitario en MECANICA
INDUSTRIAL

Alumno:
Cristian Alejandro Valenzuela Barreda

Profesor Guía:
Ing. Aldo Gabriel Fuentes Troncoso

DEDICATORIA

Primeramente, que todo le agradezco a Dios que me ha dado vida, salud y la inteligencia para poder llegar a este momento.

Le dedico de todo corazón este trabajo de título a mis padres Osvaldo Valenzuela y Olivia, a mi hermano Gabriel Valenzuela, quienes en todo momento me han apoyado y motivado a superarme y ser una mejor persona, que con esfuerzo han logrado darme todo lo necesario para poder ser feliz en esta vida, dándome valores fundamentales para desarrollarme como persona.

A mi familia, tíos, primos, que siempre han estado ahí dándome su apoyo y alegrías a mi vida.

Agradezco también a mis amigos los cuales me han apoyado, aconsejado y enseñado cuando lo he necesitado.

A todos mis profesores que, desde mis principios hasta ahora, me han provisto de conocimientos, aptitudes y valores que me han ayudado a enfrentar cada desafío que he tenido en la vida.

A don Ricardo Márquez, técnico profesional de Inchalam donde realice mi práctica, quien tuvo la disposición de enseñarme, aconsejarme y motivarme a seguir estudiando y desarrollándome en mi vida profesional.

RESUMEN

El estudio realizado en el siguiente trabajo se basa principalmente en proponer dos sistemas de riego fotovoltaico para el cultivo de maíz en una melga para la zona de Peine, pueblo atacameño ubicado en la zona precordillerana del Desierto de Atacama, II región de Antofagasta.

Gracias a su ubicación y características climáticas con cielos limpios y despejados la mayor parte del año, se considera en la actualidad uno de los lugares con mayor potencial para el uso de sistemas fotovoltaicos ya que cuenta con una elevada radiación solar.

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un sistema de riego por goteo para el riego de maíz, en una melga de 900 m².

Se reunieron datos de la climatología de la zona, como temperatura, radiación solar, horas de sol peak, tipos de suelo y cultivo, para poder obtener los requerimientos hídricos necesarios para el cultivo de maíz en la zona.

En base a los requerimientos hídricos obtenidos, se realizó el diseño de un sistema de riego por goteo, seleccionando los accesorios y equipo necesario para el correcto funcionamiento del sistema.

Se efectuaron los cálculos necesarios para la selección de una bomba solar, y para escoger un equipo fotovoltaico apropiado para accionar esta bomba, estableciendo también la inclinación necesaria de los paneles para el mejor aprovechamiento de la radiación solar.

Para finalizar se estimaron los costos para la instalación de los dos sistemas propuestos, obteniendo un presupuesto aproximado de cuánto costaría establecer un sistema de riego fotovoltaico en la zona de estudio.

INDICE

INTRODUCCIÓN 8

OBJETIVOS 9

 OBJETIVO GENERAL 9

 OBJETIVOS ESPECIFICOS 9

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO 10

 1.1. ENERGÍA SOLAR 11

 1.1.1. Energía solar fotovoltaica 11

 1.1.2. Energía solar térmica.....11

 1.2. EFECTO FOTOVOLTAICO 12

 1.3. SISTEMAS DE RIEGO 13

 1.3.1. Riego por goteo 13

 1.3.2. Riego por aspersión.....14

 1.3.3. Riego subterráneo.....14

 1.3.4. Riego hidropónico.....15

 1.3.5. Riego por nebulización 15

 1.4. TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS 16

 1.4.1. Paneles monocristalinos 16

 1.4.2. Paneles policristalinos 16

 1.4.3. Paneles capa fina 17

 1.5. TIPOS DE SISTEMA 17

 1.5.1. Sistema on-grid 17

 1.5.2. Sistema off-grid.....18

 1.6. COMPONENTES DEL SISTEMA.....19

 1.6.1. Baterías.....20

 1.6.2. Bomba centrifuga 21

 1.6.3. Gotero autocompensante.....22

 1.6.4. Inversor 23

 1.6.5. Panel fotovoltaico.....24

 1.6.6. Programador de riego.....24

 1.6.7. Regulador de carga MPPT 25

 1.6.8. Válvula solenoide.....26

 1.6.9. Válvula de retención 26

 1.6.10. Válvula de pie 27

 1.7. RECURSO SOLAR 28

 1.7.1. Declinación Solar 28

CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO 33

 2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA 34

2.2.	CONDICIONES CLIMÁTICAS	37
2.3.	AGRICULTURA EN PEINE.....	38
2.4.	NECESIDADES.....	39
2.5.	CONSIDERACIONES PARA EL SISTEMA DE RIEGO	41
2.5.1.	Tipos de suelo	41
CAPÍTULO 3: CALCULOS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO.....		43
3.1.	EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	44
3.1.1.	Coeficiente de cultivo (Kc)	44
3.1.2.	Cálculo de agua para los cultivos mediante el método blaney-criddle	45
3.2.	CALCULO DE LAS NECESIDADES BRUTAS DE AGUA DEL CULTIVO 48	
3.2.1.	Humedad aprovechable o lamina de riego	48
3.2.2.	Evapotranspiración de gotero (ETg)	50
3.2.3.	Lámina Neta de Riego (Ln).....	51
3.2.4.	Lámina bruta de riego (Lb)	52
3.2.2.	Textura del Suelo a Regar	53
3.2.3.	Esparcimiento de la Plantación y líneas de goteros	54
3.2.4.	Tasa de aplicación del Riego por Goteo (Trg)	55
	Tiempo de Riego (T).....	56
3.2.5.	Caudal necesario	57
3.3.	CÁLCULOS PARA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO	59
3.3.1.	Cálculos para selección de bomba centrífuga	59
3.3.2.	Cálculo de tuberías	66
3.3.3.	Estimación de materiales de torre estanque	67
3.4.	CÁLCULOS DE CONSUMO Y SELECCIÓN DEL EQUIPO FOTOVOLTAICO	69
3.4.1.	Cálculo de consumo estimado.....	70
3.4.2.	Cálculo del número de paneles solares	71
3.4.3.	Calculo banco de baterías.....	72
3.4.4.	Selección regulador MPPT de carga	73
3.5.	MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL SISTEMA DE RIEGO FOTOVOLTAICO	75
3.5.1.	Mantenimiento del sistema de aspiración, riego	75
		75
3.5.2.	Mantenimiento del sistema fotovoltaico	78
CAPÍTULO 4: ESTIMACIÓN DE COSTOS		82
CONCLUSIÓN		85
BIBLIOGRAFIA		86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Efecto fotovoltaico 12

Figura 1-2. Riego por goteo 13

Figura 1-3. Riego por aspersión 14

Figura 1-4. Riego subterráneo 14

Figura 1-5. Riego hidropónico 15

Figura 1-6. Riego por nebulización 15

Figura 1-7. Panel monocristalino 16

Figura 1-8. Panel policristalino 16

Figura 1-9. Panel capa fina 17

Figura 1-10. Sistema On-Grid 17

Figura 1-11. Sistema Off-Grid 18

Figura 1-12. Diagrama sistema de riego fotovoltaico 19

Figura 1-18. Baterías para instalaciones solares 21

Figura 1-15. Bomba centrífuga 22

Figura 1-15. Gotero autocompensante 23

Figura 1-14. Inversor solar para bombeo de agua 23

Figura 1-13. Detalle panel fotovoltaico 24

Figura 1-20. Programador de riego 25

Figura 1-19. Regulador de carga MPPT 25

Figura 1-18. Válvula solenoide 26

Figura 1-21. Válvula de retención 27

Figura 1-22. Válvula de pie 27

Figura 1-19. Radiación solar directa en Sudamérica 28

Figura 1-20. Declinación solar 29

Figura 1-20. Ángulos de declinación solar 30

Figura 1-21. Ángulo de radiación solar en el planeta tierra. 30

Figura 1-22. Representación radiación solar hacia un panel fotovoltaico 31

Figura 2-1. Mapa ubicación pueblo de Peine, Antofagasta 34

Figura 2-2. Ubicación laguna Legía 35

Figura 2-3. Canales de riego en pueblo de Peine 35

Figura 2-4. Tranque de Kene 36

Figura 2-5. Canales matrices de mampostería en Peine 37

Figura 2-5. Mapa radiación solar Chile 38

Figura 2-6. Melga de cultivo de maíz 39

Figura 2-7. Zona de melgas en el Pueblo de Peine 40

Figura 2-8. Tipos de suelo 41

Figura 2-9. Distribución de suelos en la región de Antofagasta 42

Figura 3-1. Líneas de riego 55

Figura 3-2. Diseño propuesta N°1.....59

Figura 3-3. Bomba solar de superficie 64

Figura 3-3. Tuberías sistema de riego 66

Figura 3-4. Ejemplo de torre para estanque 68

Figura 3-5. Datos con la información solar del lugar de instalación 70

Figura 3-6. Panel solar 120 W.....71

Figura 3-7. Batería Victron GEL 12V 220 Ah.....72

Figura 3-8. Conexión baterías para 48v 73

Figura 3-9. Regulador de carga MPPT 74

Figura 3-10. Válvula de pie obstruida.....75

Figura 3-11. Partes principales de una bomba solar centrífuga 76

Figura 3-12. Emisor obstruido por sales minerales.....77

Figura 3-13. Componentes de una válvula solenoide de riego 78

Figura 3-14. Limpieza de un panel solar.....79

Figura 3-15. Limpieza de una batería solar.....80

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Coeficientes únicos de cultivo (Kc).....45

Tabla 3-2. Temperaturas mínimas, máximas y promedio de Peine 46

Tabla 3-3. Cálculo de ET₀, según T° media y % de horas de luz 47

Tabla 3-4. Resultados evapotranspiración enero-junio 47

Tabla 3-5. Humedad aprovechable para distintas clases texturales de suelo 49

Tabla 3-6. Resultados Etg enero-junio.....51

Tabla 3-7. Resultados Ln enero-junio 52

Tabla 3-8. Resultados Lámina bruta de riego enero - diciembre 53

Tabla 3-9. Recomendaciones de distancia y caudal de goteros 54

Tabla 3-10. Resultados T enero – diciembre. 56

Tabla 3-11. Requerimientos necesarios durante el año para el maíz. 58

Tabla 3-12. Tabla especificaciones técnicas bomba solar 65

Tabla 3-13. Curva y tabla de rendimiento bomba solar 65

Tabla 3-14. Tabla de actividades de mantenimiento preventivo.....81

Tabla 4-1. Estimación de costos propuesta N°1 84

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

CA	:	Corriente alterna
CC	:	Corriente continua
Cd	:	Cadmio
CNR	:	Comisión Nacional de Riego
Li	:	Litio
mh	:	Hidruro metálico
Ni	:	Níquel
CIREN	:	Centro de información de recursos naturales
Po	:	Polímero
FAO	:	Organización de las naciones unidas para la alimentación y la industria
PVC	:	Cloruro de polivinilo
Msnm	:	Metros sobre el nivel del mar
NPSH	:	Net positive suction head (altura neta positiva de aspiración)
Hsp	:	Horas de sol peak
Ptpv	:	Potencia total de paneles
MPPT	:	Seguidor de punto de máxima potencia
Ctb	:	Capacidad total de baterías
FV	:	Fotovoltaico

SIMBOLOGÍA

ha	:	Hectárea
km	:	Kilometro
kWh	:	Kilovatio hora
l	:	Litro
m	:	Metro
m ²	:	Metro cuadrado
cm	:	Centímetro
Km ²	:	Kilómetro cuadrado
Etc	:	Evapotranspiración de cultivo
Kc	:	Coeficiente de cultivo
t	:	Temperatura
p	:	Porcentaje de horas luz
ET ₀	:	Evapotranspiración de referencia
ET _c	:	Evapotranspiración del cultivo
mm	:	Milímetro
H	:	Humedad aprovechable
%CC	:	Contenido porcentual volumétrico a capacidad de campo
%PMP	:	Contenido porcentual volumétrico en punto de marchitez permanente
ETg	:	Evapotranspiración de gotero
Ln	:	Lámina de riego neta
Ef	:	Eficiencia de riego
Lb	:	Lamina bruta de riego
h	:	Hora
Trg	:	Tasa de aplicación de goteo
Q	:	Caudal volumétrico
Hf	:	Perdida de carga
C	:	Coeficiente de Hazen Williams
mH ₂ O	:	Metros de agua
Pa	:	Presión atmosférica
W	:	Wattios
A	:	Amper
V	:	Voltio

INTRODUCCIÓN

Peine, pueblo atacameño ubicado en la zona precordillerana del Desierto de Atacama, con una cultura agro-alfarera, dedicada al cultivo del maíz, la papa y la quínoa, además de la ganadería de auquénidos como llamas y vicuñas.

Debido a su condición de oasis, situado cerca de vertientes de agua dulce y con un excelente clima, se dan condiciones muy favorables para la agricultura, gracias a lo cual sus habitantes aún sacan provecho de esto.

Mayormente las tierras de cultivos están alejadas de la zona de viviendas del pueblo, lo cual genera que, a diario, la gente que caminar hacia sus terrenos para trabajar en la siembra y regadío que tienen que hacer periódicamente.

Geográficamente la zona de cultivos está en pendiente, lo cual genera que la distribución del agua de riego sea desigual, haciendo que los terrenos de más arriba reciban más agua que los demás, lo que podría generar que los últimos terrenos de más abajo reciban un caudal de agua insuficiente para satisfacer sus necesidades de regadío.

Gracias a la condiciones geográficas y climáticas del pueblo de Peine, es posible diseñar un sistema de riego solar para poder ahorrar agua y ayudar a sus habitantes a no tener que estar desplazándose constantemente a regar sus cultivos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer el diseño un sistema de riego solar off grid para pequeños agricultores de la comunidad atacameña de Peine.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Ejecutar cálculos para el correcto funcionamiento y selección de componentes del sistema de riego.

Establecer un plan de mantenimiento preventivo

Estimar los costos de inversión del sistema de riego solar.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEORICO

1.1. ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una energía renovable e inagotable, obtenida a partir de la radiación electromagnética del Sol.

Se puede captar a través de celdas fotovoltaicas que luego estas la transforman a energía solar fotovoltaica o colectores solares los cuales la transforman en energía solar térmica.

La energía solar es una de las fuentes de energías renovables más fáciles de producir, especialmente la solar fotovoltaica, lo cual se ha visto su incremento en el uso de estas tecnologías especialmente en el Norte de Chile.

1.1.1. Energía solar fotovoltaica

Consiste en la obtención de la energía eléctrica a partir de la radiación solar, gracias a paneles solares fotovoltaicos que están contruidos con celdas de silicio las cuales, mediante el efecto fotovoltaico, transforman los fotones provenientes del sol a energía eléctrica.

1.1.2. Energía solar térmica

Consiste en el aprovechar la energía del Sol para transformarla en energía térmica que se distribuye en algún fluido, se puede ocupar para cocinar o calentar agua, destinada al consumo doméstico.

1.2. EFECTO FOTOVOLTAICO

Consiste en convertir directamente la energía solar en corriente eléctrica, esto sucede ya que la luz solar al estar compuesta por fotones, estos poseen diferentes niveles de energía, debido a su longitud de onda los fotones al incidir sobre una celda fotovoltaica pueden ser reflejados o absorbidos, el fotón al ser absorbido ingresa por la celda y le cede su energía a un electrón el cual al ser energizado rompe la inercia y fluye por la celda creando corriente, esto resulta por las propiedades químicas y físicas presentes en la celda fotovoltaica.

La celda fotovoltaica está hecha de silicio, un semiconductor que, al estar expuesto a la energía de los fotones, los electrones del átomo de silicio se agitan de manera que se propagan fácilmente entre ellos y generan corriente eléctrica.

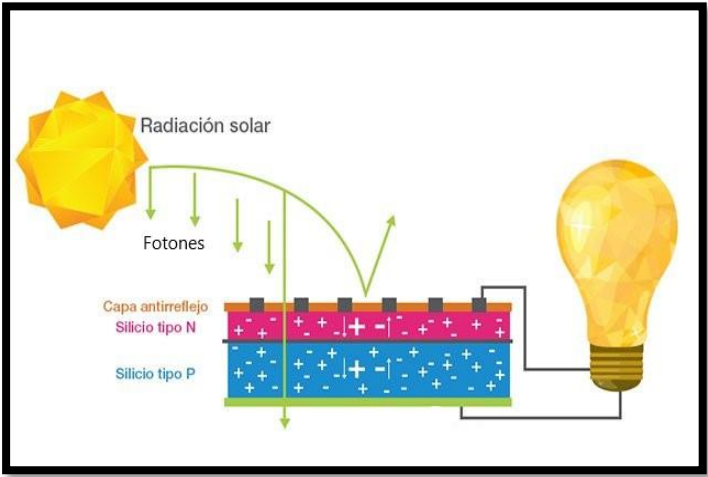


Figura 1-1. Efecto fotovoltaico
Fuente: <https://rsolar.com.mx>

1.3. SISTEMAS DE RIEGO

Se denomina sistema de riego al conjunto de estructuras que hace posible que una determinada área pueda ser cultivada con la aplicación del agua necesaria a las plantas.

1.3.1. Riego por goteo

Es un método de riego por irrigación que permite una óptima aplicación de agua y abonos en los cultivos. Este sistema es utilizado para localizar el agua al pie de cada planta.

El agua aplicada se infiltra en el suelo irrigando de manera directa la zona de cultivos, a través de un sistema de tuberías.

Una de las principales ventajas de este sistema es el ahorro de grandes cantidades de agua, y el mantenimiento de un constante nivel de humedad en el suelo sin generar pozas ni estancamientos de agua.



Figura 1-2. Riego por goteo
Fuente: <https://innovacioneconomica.com>

1.3.2. Riego por aspersión

Es un método de riego que consiste en aplicar el agua mediante un chorro pulverizado en gotas imitando la lluvia. Esto funciona a través de una red de tuberías que transporta el agua hasta los aspersores, los cuales utilizan presión para dispararla, potenciado a través de un sistema de bombeo.



Figura 1-3. Riego por aspersión

Fuente: <https://www.iagua.es>

1.3.3. Riego subterráneo

Está basado en un sistema de riego que tiene perforaciones en las tuberías y estas son enterradas a una determinada profundidad, entre 10 y 50 cm, según sea el tipo de cultivo a regar. Esto asegura que el agua llega directamente a la raíz de la planta.

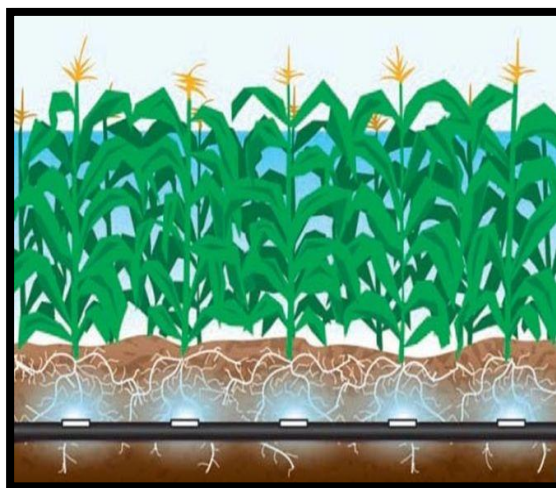


Figura 1-4. Riego subterráneo

Fuente: <https://staticmer.emol.cl>

1.3.4. Riego hidropónico

Es un sistema de riego por medio del cual las raíces de los cultivos reciben una solución con nutrientes disuelta en agua, con todos los elementos nutricionales y químicos requeridos para el buen crecimiento de las plantas. Estas crecen en la solución mineral o sustrato.



Figura 1-5. Riego hidropónico
Fuente: <http://karisarivera.blogspot.com>

1.3.5. Riego por nebulización

Consiste en la expulsión de agua en forma de neblina, por medio de emisores ubicados en la parte superior de los cultivos, estos emisores se llaman nebulizadores.

El agua a presión sale por un pequeño orificio de manera que el chorro generado choca con una pared cóncava que lo lanza y distribuye en forma nebulizada.



Figura 1-6. Riego por nebulización
Fuente: <https://vegetaleslineaverde.com>

1.4. TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

1.4.1. Paneles monocristalinos

Son paneles fabricados a partir de silicio puro fundido con una pequeña cantidad de boro el cual le entrega una mayor conductividad a la celda, generalmente las láminas de estos paneles son de forma redondeada.



Figura 1-7. Panel monocristalino
Fuente: <https://solarmat.es>

1.4.2. Paneles policristalinos

Son paneles fabricados a partir de silicio como base, pero a diferencia de los monocristalinos, están hechos a partir de cortes a un bloque de silicio solidificado, es más económico ya que no presenta aleaciones y sus bordes son cuadrados lo que los hace tener un menor rendimiento.

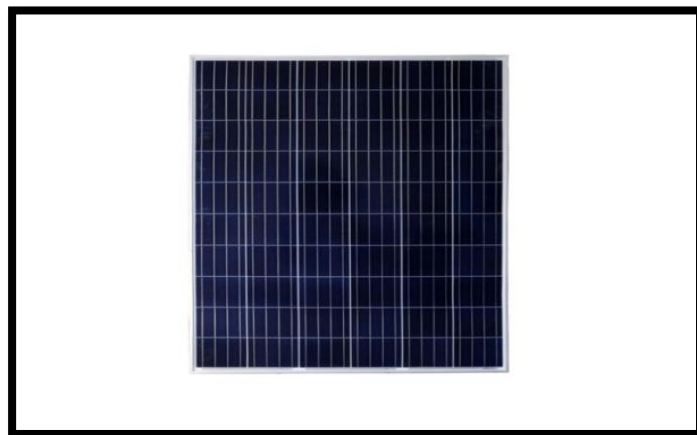


Figura 1-8. Panel policristalino
Fuente: <http://www.aquitosolar.cl>

1.4.3. Paneles capa fina

Son paneles fabricados en una sola capa delgada de silicio y no requieren de un ensamble de varias celdas, son más delgados por lo cual son de menor rendimiento y producen menos energía eléctrica, se ocupa en pequeños equipos como calculadoras, relojes, baterías, etc.

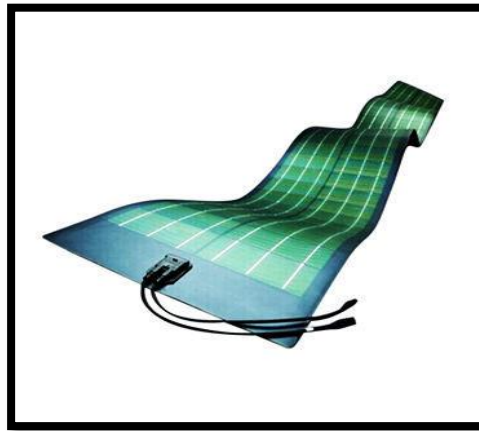


Figura 1-9. Panel capa fina
Fuente: <http://www.megavattios.com.ar>

1.5. TIPOS DE SISTEMA

1.5.1. Sistema on-grid

Este sistema consiste en el funcionamiento de un equipo gracias a la captación de energía solar que luego es convertida por los paneles fotovoltaicos a energía eléctrica, ocupando la energía producida por los paneles en horas de sol y durante la noche toma la energía de la eléctrica local, además si es que existe energía que no se ocupa en nuestro equipo, se va hacia el sistema interconectado central de electricidad.

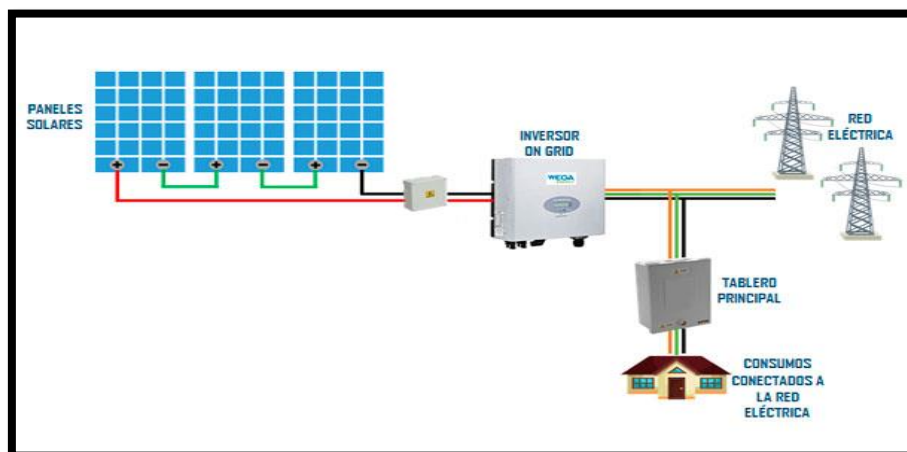


Figura 1-10. Sistema On-Grid
Fuente: <https://www.wega-lighting.com>

1.5.2. Sistema off-grid

Este sistema consiste en el funcionamiento de un equipo gracias a la captación de energía solar que luego es convertida por los paneles fotovoltaicos a energía eléctrica luego es enviada hacia un inversor solar el cual se encarga de recibir esta energía y adaptarla de acuerdo con los requerimientos de nuestro sistema electrónico.

A diferencia del sistema on-grid, este no está conectado a la red eléctrica local, por lo cual solo funcionara en horas de sol cuando reciba la energía proveniente de este y con la energía que contengan las baterías del sistema.

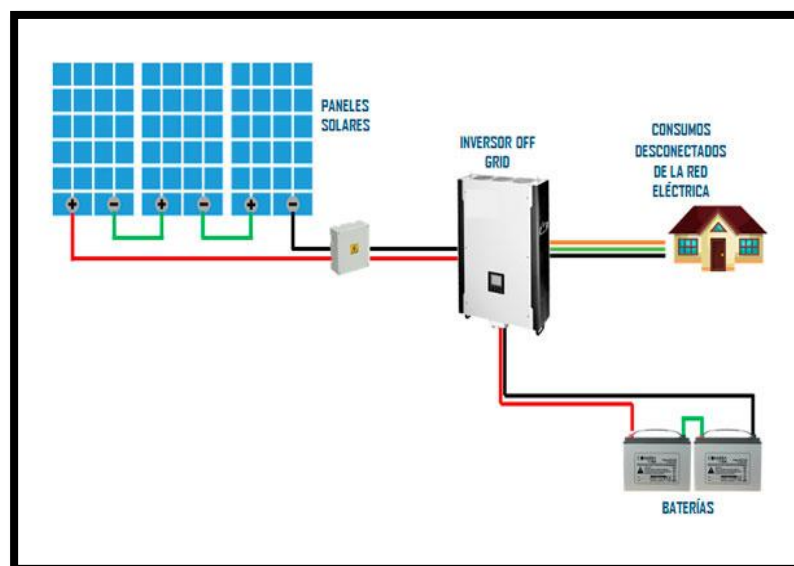


Figura 1-11. Sistema Off-Grid
Fuente: <https://www.wega-lighting.com>

1.6. COMPONENTES DEL SISTEMA

El presente ítem está dedicado a dar a conocer los diferentes componentes que conforman un sistema de riego solar, en donde se describirán cada uno de los elementos que conforman este sistema. A continuación, se muestra un ejemplo de una configuración estándar de bombeo fotovoltaico para dar una idea de cómo se compone este sistema.

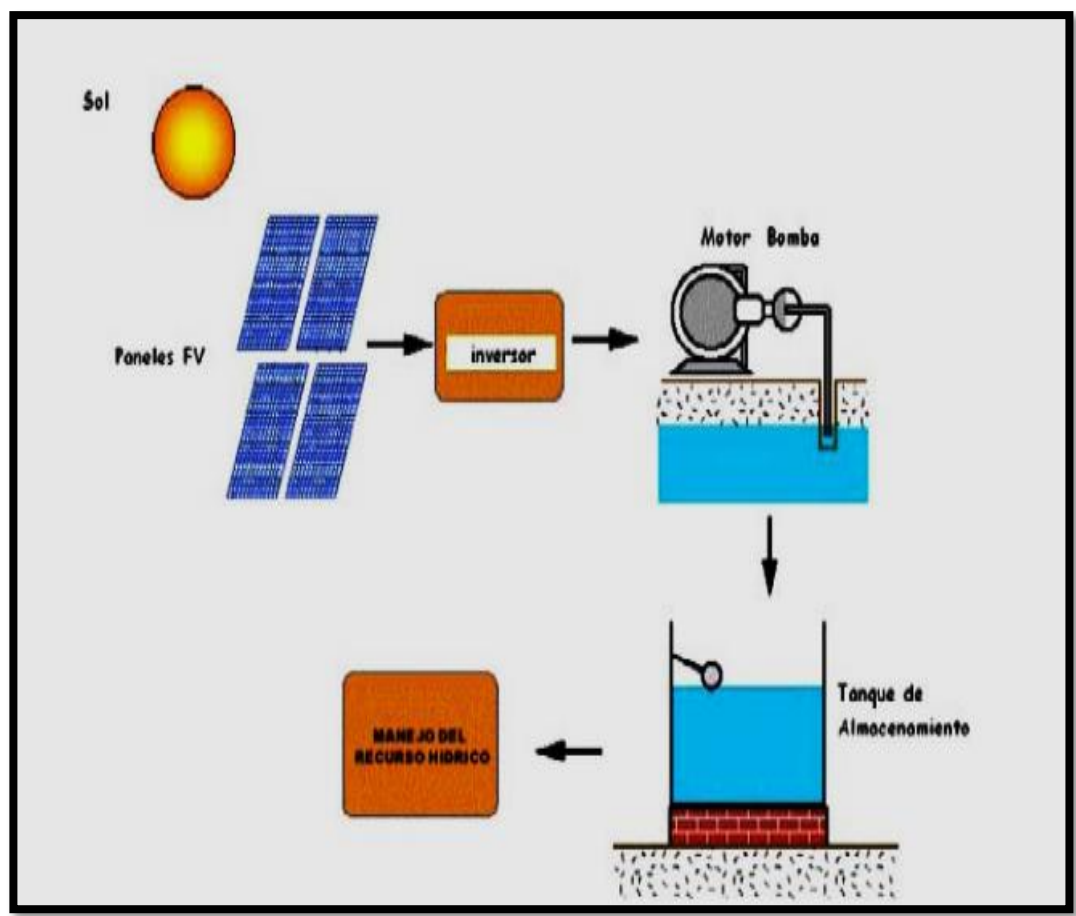


Figura 1-12. Diagrama sistema de riego fotovoltaico
Fuente: <https://www.wega-lighting.com>

1.6.1. Baterías

Las baterías o acumuladores son dispositivos que almacenan energía eléctrica.

Es un dispositivo que formado por una o varias celdas electroquímicas, puede convertir la energía química que almacena en electricidad. A diferencia de las pilas, la reacción química que permite su funcionamiento es reversible, lo que permite volver a cargar la batería por medios eléctricos.

Así, las baterías generan corriente continua y, de esta manera, sirven para alimentar distintos circuitos eléctricos, dependiendo de su tamaño y potencia.

Para nuestro sistema de riego solar fotovoltaico ocuparemos baterías solares, las cuales tienen el objetivo de acumular la energía eléctrica generada por los paneles solares, para poder utilizar la energía durante la noche o en días nublados cuando la radiación solar sea escasa.

Tipos de baterías

- Baterías de plomo-ácido, que están formadas por electrodos de plomo bañados en un electrolito de ácido sulfúrico. Las hay de muchos tipos que veremos a continuación. En general son económicas y fáciles de fabricar. No admiten sobrecargas ni descargas profundas y tienen un peso y volumen elevados para la energía que almacenan.
- Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd), que están formadas por electrodos de cadmio bañados en un electrolito de hidróxido de potasio. Funcionan bien en un amplio rango de temperaturas y se pueden sobrecargar sin sufrir daños. Admiten descargas profundas y proporcionan un buen número de ciclos, pero acusan mucho el efecto memoria. Su peso y volumen, aunque mejores que los de las baterías de plomo-ácido, siguen siendo elevados para la energía que almacenan.
- Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), que están formadas por un ánodo de cadmio y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Están sustituyendo a las baterías de níquel-cadmio por su menor efecto memoria y mayor capacidad. Sin embargo, el número de ciclos que proporcionan es menor y no trabajan bien con frío extremo, que reduce drásticamente su capacidad.

- Baterías de iones de litio (Li-ion), que emplean un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina u óxido de manganeso. En comparación con los tipos anteriores, son de desarrollo más reciente. Su capacidad es elevada en relación a su peso y volumen, teniendo además un factor de autodescarga muy reducido. Casi no se ven afectadas por el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de haber sido descargadas previamente. Como contrapartida no soportan bien los cambios de temperatura y no admiten descargas completas, sufriendo mucho cuando éstas ocurren.
- Baterías de polímero de litio (Li-Po), son una variación de las baterías de iones de litio que mejoran sus características de peso y volumen, así como su tasa de descarga. Al igual que sus primas de iones de litio acusan mucho las descargas profundas, quedando prácticamente inutilizadas si se descargan en exceso.



Figura 1-18. Baterías para instalaciones solares
Fuente: www.solarnet.com

1.6.2. Bomba centrífuga

Una bomba centrífuga es un tipo de bomba hidráulica que, mediante un impulsor o rodete, permite transformar la energía mecánica en energía cinética de un fluido incompresible.

Se utiliza en instalaciones hidráulicas en el sector industrial, comercios o viviendas, ya que su objetivo es proporcionar una solución práctica a la falta de presión en el suministro de algún líquido.



Figura 1-15. Bomba centrífuga
Fuente: www.hidroymas.com

1.6.3. Gotero autocompensante

Es una pieza de plástico compuesta por una membrana que suministra agua y funciona bajo presión. Se emplea en sistemas de riego por goteo en jardinería y plantaciones agrícolas contribuyendo a generar un ahorro de agua significativo.

El gotero autocompensante lleva una membrana que funciona bajo presión, cuanto mayor sea ésta, mayor resistencia opondrá la membrana para mantener un caudal constante. Esto es, la membrana se cierra al aumentar la presión para que no aumente el volumen de agua que entra, y así se mantenga igual al caudal deseado.

Una de las ventajas de este sistema es controlar mejor la salida del agua, y la posibilidad de hacer líneas mucho más largas manteniendo uniformidad de caudal entre la primera y última línea.



Figura 1-15. Gotero autocompensante
Fuente: mundoriego.es

1.6.4. Inversor

Un inversor de corriente es un dispositivo electrónico que tiene como función cambiar el voltaje de entrada de corriente continua, a un voltaje de salida de corriente alterna. Es decir, transforma los 12v o 24v de la corriente de una batería (corriente continua) a 220v (corriente alterna) como la que tenemos en una vivienda.

Los inversores de corriente se utilizan en gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación, hasta en grandes aplicaciones industriales.



Figura 1-14. Inversor solar para bombeo de agua
Fuente: <https://www.damiasolar.com>

1.6.5. Panel fotovoltaico

Uno de los principales componentes, por no decir el más importante en este tipo de instalaciones, es el módulo o panel fotovoltaico, ya que corresponde al corazón del sistema, si éste falla no podrán funcionar de manera correcta ninguno de los otros componentes, por lo que no se podrá hacer llegar energía al resto del sistema. Los módulos solares fotovoltaicos se construyen para una vida útil al menos de 20 años.

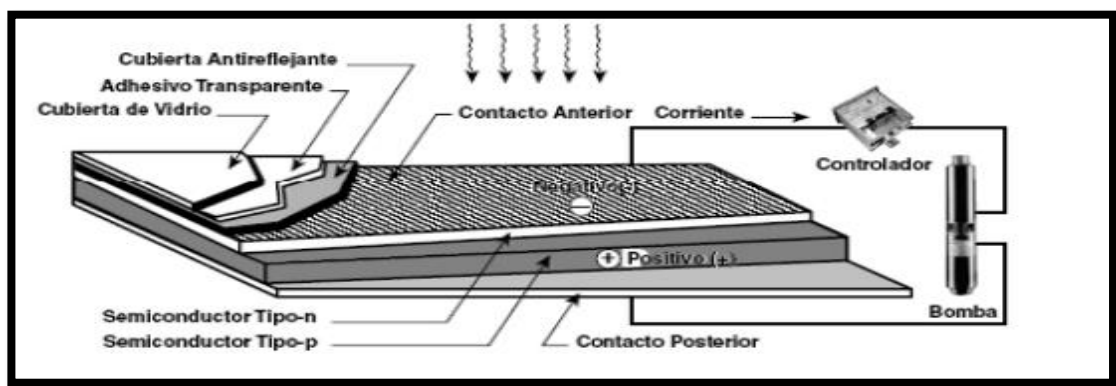


Figura 1-13. Detalle panel fotovoltaico
Fuente: <https://www.electricasas.com>

1.6.6. Programador de riego

Un programador de riego es un dispositivo electrónico digital o análogo, que sirve para automatizar un proceso de riego mediante electroválvulas o válvulas solenoides, permitiendo programar ciclos con un horario, duración y frecuencia totalmente personalizada.

Permite el riego de cultivos sin necesidad de estar presente, se adapta a cualquier sistema de riego y permite ahorrar hasta un 25% del consumo de agua.



Figura 1-20. Programador de riego
Fuente: www.naturaenergy.cl

1.6.7. Regulador de carga MPPT

Un regulador MPPT es un tipo de controlador de carga que permite obtener la máxima potencia de los paneles solares haciéndolos trabajar siempre en el punto de máxima potencia. Con estos reguladores se saca generalmente más rendimiento a los paneles y permiten la utilización de paneles que no se pueden usar con reguladores PWM (debido a la compatibilidad de la tensión del panel y la batería).

Los reguladores MPPT maximizan su corriente a la salida de las baterías. Son capaces de adaptar la entrada fotovoltaica a la tensión de las baterías. Esto permite hacer funcionar el panel solar en su punto de máxima potencia para así obtener la máxima eficiencia de producción en cada instante.



Figura 1-19. Regulador de carga MPPT
Fuente: www.naturaenergy.cl

1.6.8. Válvula solenoide

Una válvula solenoide es un dispositivo operado eléctricamente que es utilizado para controlar el flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o cerrada.

Esta válvula puede ser cerrada por gravedad, por presión o por la acción de un resorte; y es abierta por el movimiento de un émbolo operado por la acción magnética de una bobina energizada eléctricamente, o viceversa.

Puede ser controlada por interruptores eléctricos simples, termostáticos, de flotador, de baja presión, de alta presión, por reloj, o cualquier otro dispositivo que abra o cierre un circuito eléctrico.



Figura 1-18. Válvula solenoide

Fuente: www.koslan.cl

1.6.9. Válvula de retención

Las válvulas de retención son válvulas automáticas y autónomas que se utilizan para evitar la inversión del flujo en un conducto.

Esta válvula tiene un funcionamiento automático, dejando pasar el agua en un sentido de la tubería y cerrando el paso cuando cesa el flujo, por ejemplo, cuando se detiene la bomba, evitando el flujo en sentido contrario ya que debido a esto se generan

sobrepresiones en el flujo de agua y se transmite en forma de onda de choque, esto se denomina Golpe de Ariete y puede alcanzar varias veces la presión nominal de trabajo y ser muy dañino para las bombas hidráulicas.



Figura 1-21. Válvula de retención
Fuente: blog.valvulasarco.com

1.6.10. Válvula de pie

Una válvula de pie es un tipo de válvula de retención que se instala en la base de succión de la tubería que va hacia la bomba, evita que se produzca el vaciado en la tubería de impulsión, a su vez incluye un filtro para evitar la entrada de elementos perjudiciales en la tubería.



Figura 1-22. Válvula de pie
Fuente: valvuladepie.com

1.7. RECURSO SOLAR

En Chile, el norte grande recibe la mayor cantidad de radiación solar diaria promedio del mundo (kWh/m²/día) y se estima que un área de 20 km² de paneles fotovoltaicos podría satisfacer la demanda energética de todo el país.

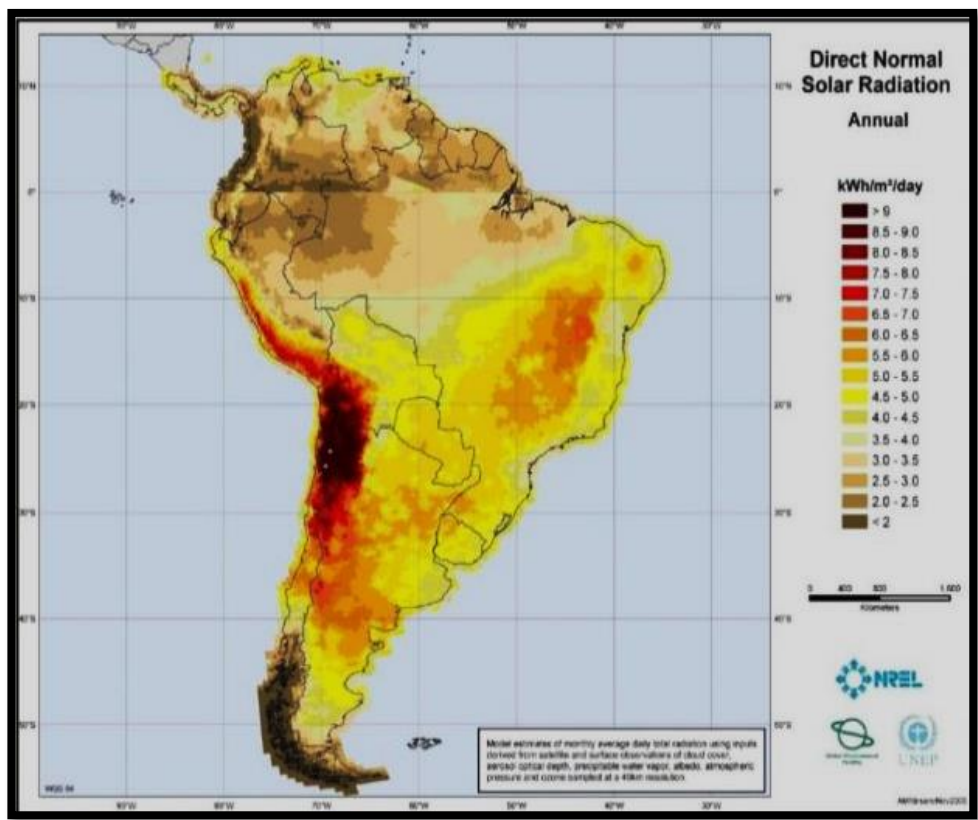


Figura 1-19. Radiación solar directa en Sudamérica
Fuente: <https://www.nrel.gov>

1.7.1. Declinación Solar

El planeta Tierra realiza dos movimientos en el espacio: la traslación en una órbita elíptica alrededor del sol, y la rotación sobre su propio eje. En relación al plano de la órbita alrededor del sol, el eje de la tierra está inclinado en un ángulo de 23.5°. Esta inclinación origina la variedad estacional, incide en el valor de la declinación solar y en la forma en que la radiación solar alcanza la superficie del planeta.

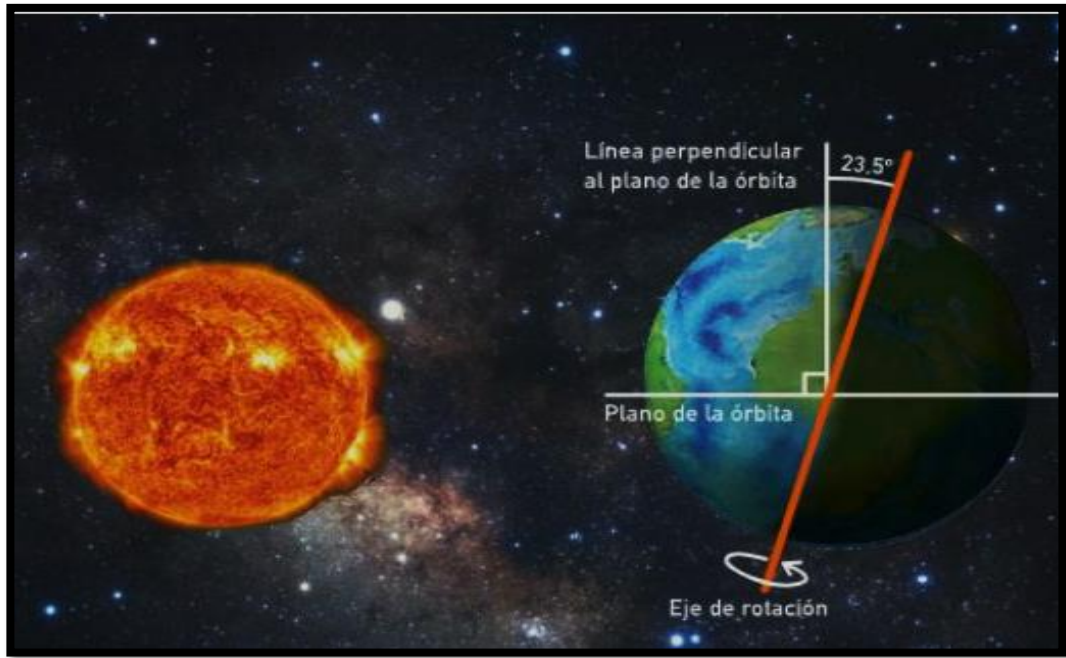


Figura 1-20. Declinación solar

Fuente: <https://www.indap.gob.cl>

La declinación solar es un ángulo variable entre el plano ecuatorial de la tierra y los rayos del sol. Debido a la inclinación del eje de la tierra este ángulo varía continuamente de -23.45° a $+23.45^{\circ}$ en un lapso de seis meses, alcanzando su valor máximo y mínimo para los solsticios de verano (21 de diciembre) y de invierno (21 de junio) respectivamente, El valor de la declinación solar es 0° dos veces al año, para los equinoccios de otoño y primavera cuando la radiación solar cae perpendicularmente (90°) sobre la línea del ecuador, a las 12 del día.

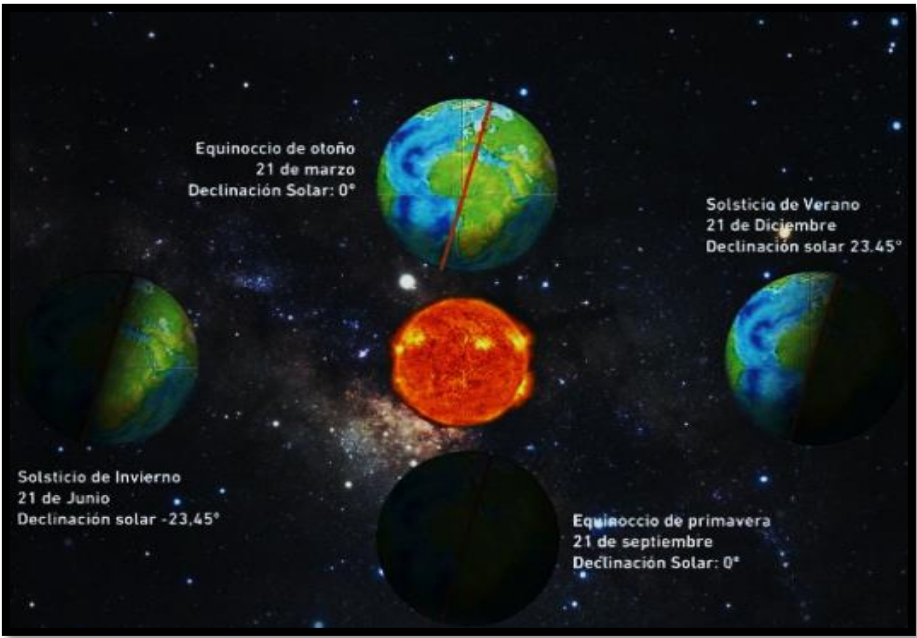


Figura 1-20. Ángulos de declinación solar
Fuente: <https://www.indap.gob.cl>

La radiación solar varía su intensidad según su ángulo de entrada a la atmosfera que rodea el planeta tierra. Su valor cambia durante la hora del día, la estación del año, y la latitud donde estemos ubicados. Si la radiación cae en 90° ella atravesará una capa delgada de atmósfera, incidiendo concentradamente sobre la superficie, con la sombra exactamente bajo una persona.

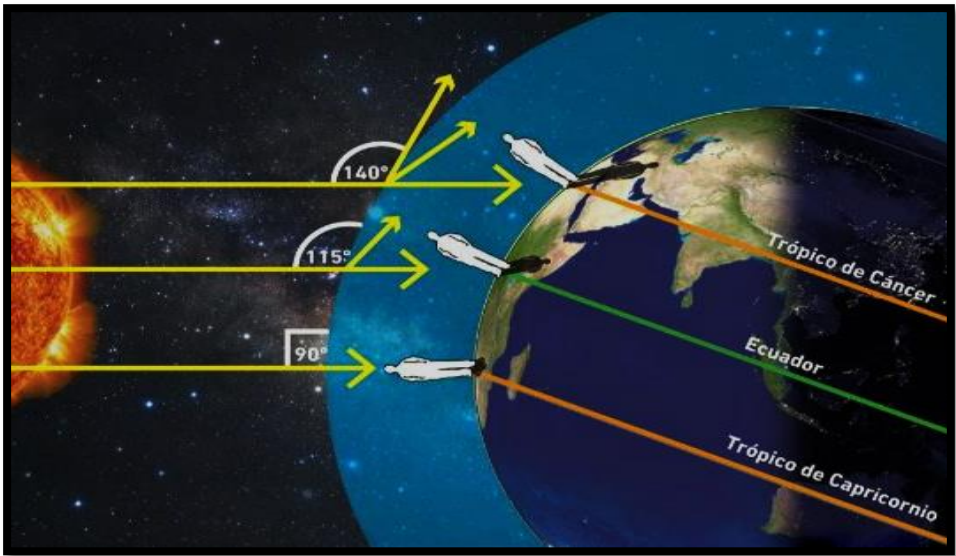


Figura 1-21. Ángulo de radiación solar en el planeta tierra.
Fuente: <https://www.indap.gob.cl>

El panel fotovoltaico capta la radiación directa y la difusa, por lo que en muchas ocasiones se pueden tener valores de irradiancia superiores a 1000 W/m² y generar energía en días nublados, cuando predomina la radiación difusa.

Cada superficie refleja la radiación solar en distinta proporción, lo que se conoce como el factor Albedo, siendo este más alto en una superficie reflectante como la nieve y menor en un campo o zona boscosa.

El albedo es el porcentaje de radiación reflejada en una superficie, respecto a la radiación que incide sobre ella. Superficies claras como la nieve, tienen valores de albedo superiores a las oscuras como el suelo desnudo, y las superficies brillantes tienen un albedo mayor a las mates.

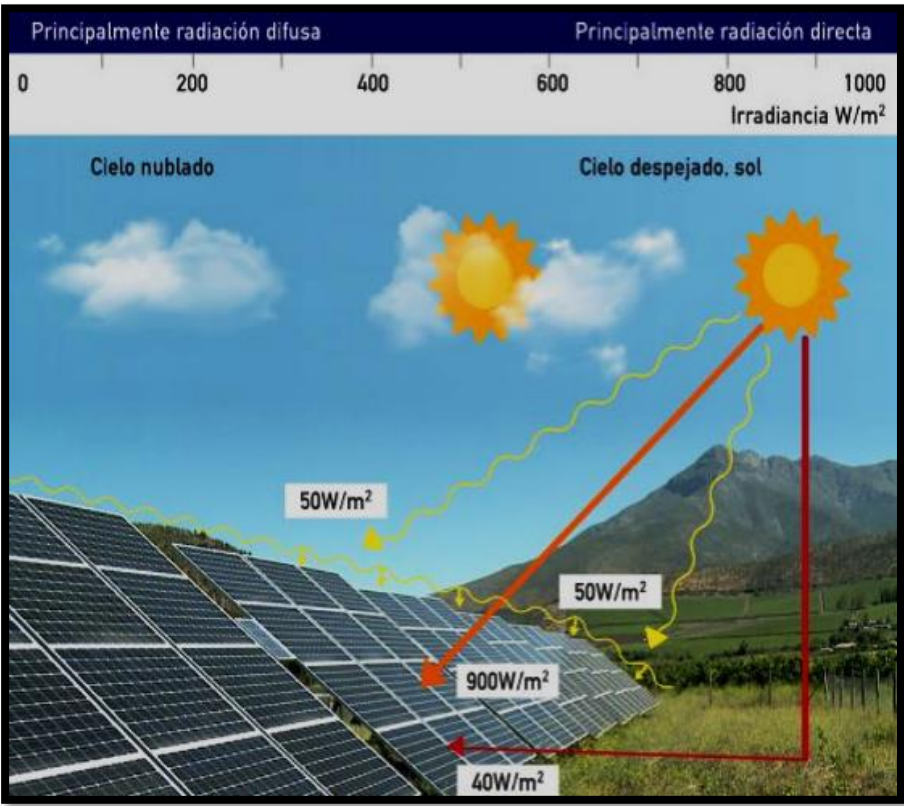


Figura 1-22. Representación radiación solar hacia un panel fotovoltaico
Fuente: <https://www.indap.gob.cl>

CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

2. **PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO**

2.1. **UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema de riego fotovoltaico (Off-Grid) para la II región de Antofagasta, específicamente para la comunidad rural de Peine, pueblo atacameño ubicado en la zona precordillerana del Desierto de Atacama a 120 km de San Pedro de Atacama.

Sus habitantes se dedican principalmente a la agricultura (maíz, alfalfa, papas, zanahoria) y ganadería (corderos, vacunos, burros).

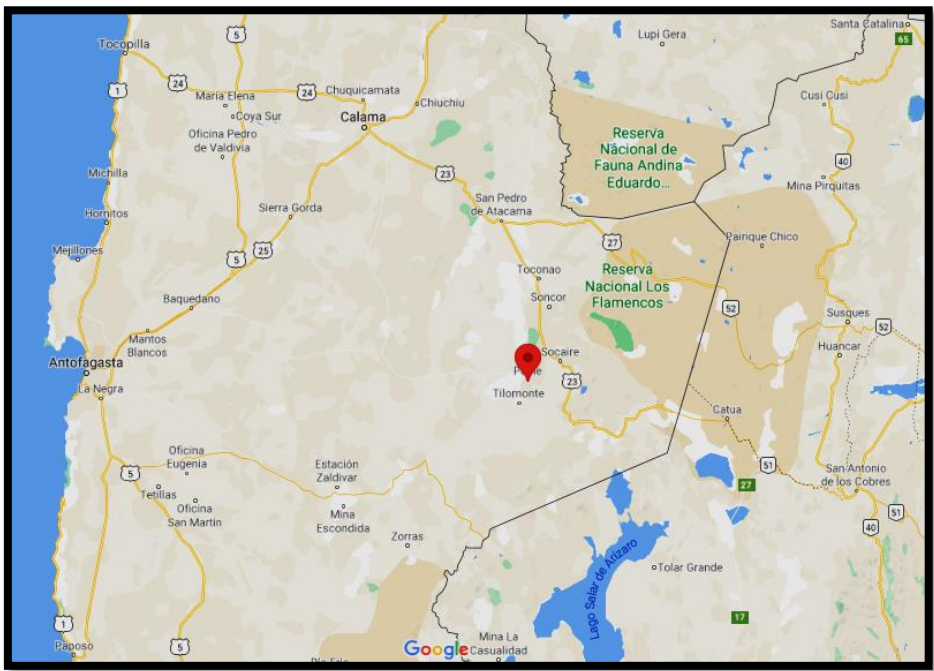


Figura 2-1. Mapa ubicación pueblo de Peine, Antofagasta
Fuente: Google maps

Según la información entregada por la Comisión Nacional de Riego (CNR) en la Región de Antofagasta existen 353 km lineales de canales de riego, las cuales su principal origen o fuentes hidrográficas son los ríos Loa y San Pedro, quebradas de Cupo, Toconao, Soncor, laguna Legía de la cual se obtiene el agua mediante vertientes hacia el poblado de Peine para el consumo y riego de sus cultivos y predios.

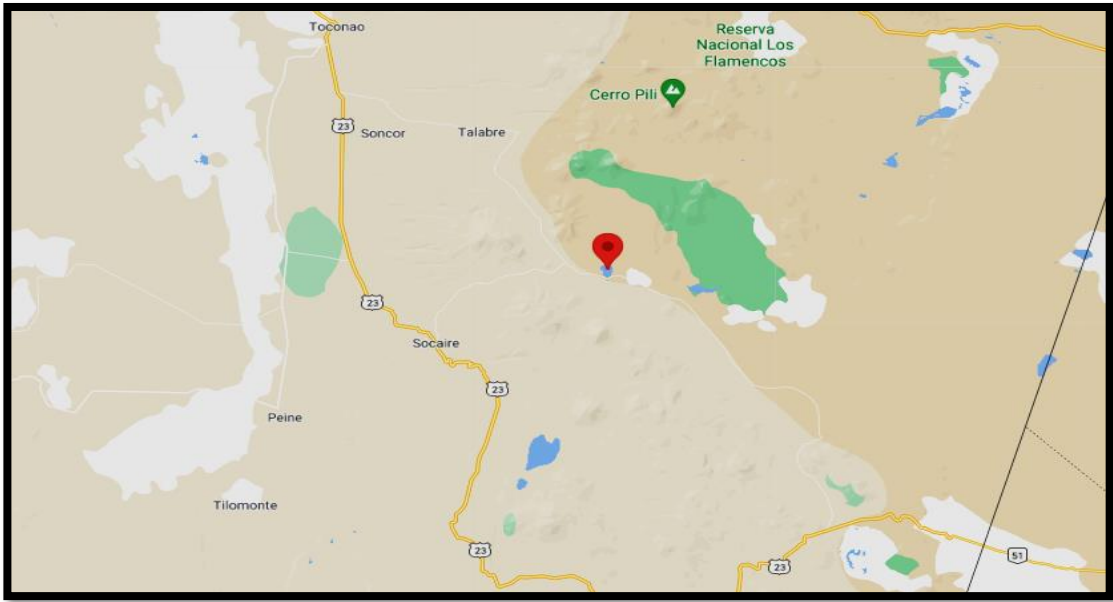


Figura 2-2. Ubicación laguna Legía
Fuente: Google maps

En la siguiente imagen podremos observar el camino físico que toman los canales de riego en el pueblo de Peine, representados con una línea celeste, según el mapa de la Comisión Nacional de Riego (CNR).

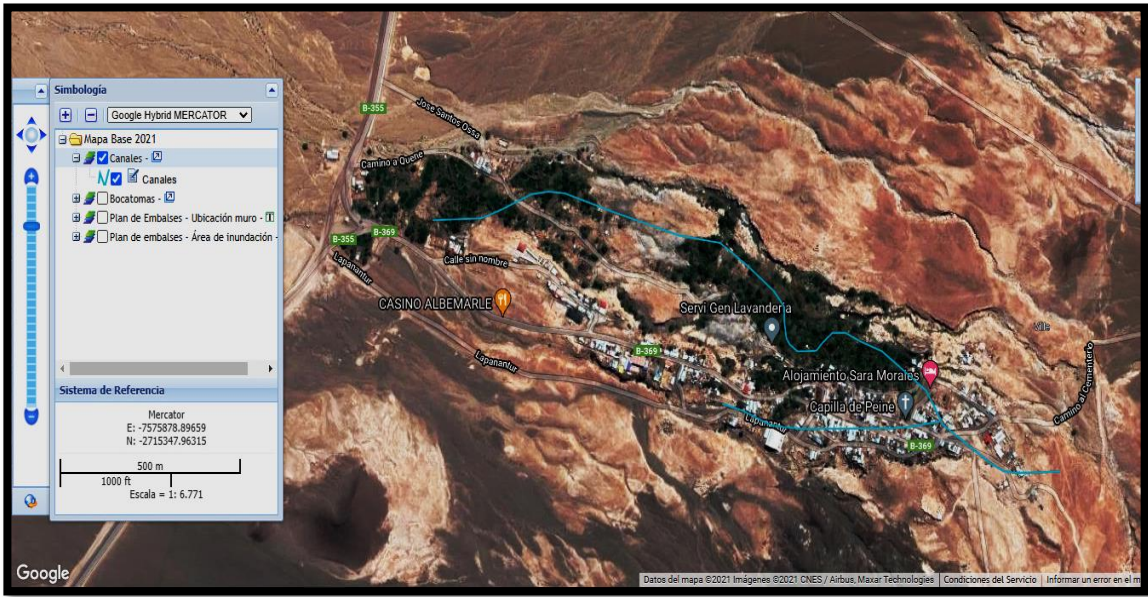


Figura 2-3. Canales de riego en pueblo de Peine
Fuente: <https://esiir.cnr.gob.cl/>

Peine posee una vertiente llamada Peine o Wilte en lo alto del pueblo, con un caudal de 1,8 l/s aprox. Que riega 17,50 ha. Para asegurar el riego posee tres tranques, el Tranque Nacimiento que apoya al tranque Pailabote y Tranque Kene que riega el sector de Kene principalmente sembrado con alfalfa. Su sistema de cultivos es por eras o melgas y el riego es por canales, mayormente de mampostería.



Figura 2-4. Tranque de Kene

Fuente: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26758>



Figura 2-5. Canales matrices de mampostería en Peine
Fuente: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26758>

2.2. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los cielos limpios y despejados del desierto son una característica climática que lo convierte en una de las zonas del mundo de mejor aptitud para aprovechar la energía solar, en la actualidad, se considera que es uno de los lugares del mundo de mayor potencial como fuente energética solar es el desierto de Atacama chileno. Por las características climáticas y de relieve presentes en gran parte de la zona norte del país, este presenta un alto número de días despejados (sin nubes) en el año.

Según el explorador solar del ministerio de energía de Chile, la zona donde se ubica el pueblo de Peine en la región de Antofagasta, coordenadas S23°43'0.01"

O68°4'59.99", presenta altos niveles de radiación solar (7 kWh/m²/día), y una frecuencia de nubes de apenas 6%, lo que lo hace un ambiente perfecto para la instalación y el buen funcionamiento del sistema de riego solar OFF-GRID.

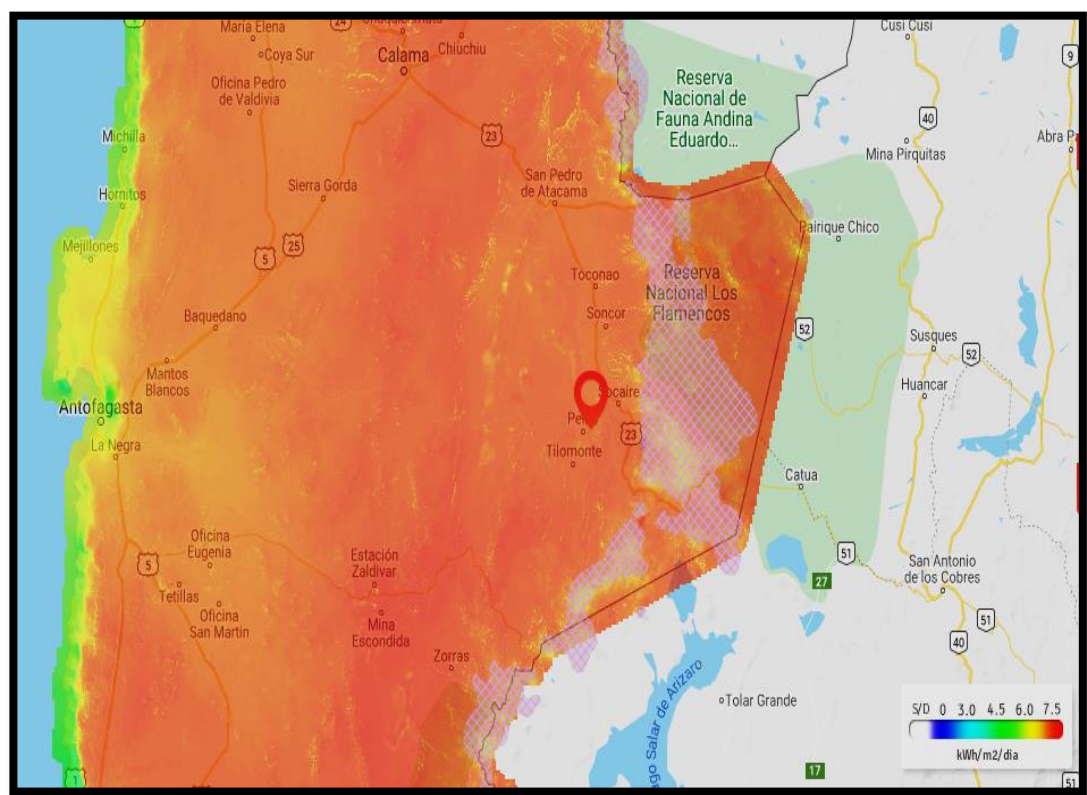


Figura 2-5. Mapa radiación solar Chile
Fuente: <http://solar.minenergia.cl/exploracion>

2.3. AGRICULTURA EN PEINE

Los suelos, principalmente alcalinos y con contenidos significativos de sales, los hacen no aptos para actividades agrícolas intensivas como por ejemplo la plantación de árboles frutales a gran escala, a excepción de algunas áreas específicas como quebrada de Jeré en Toconao. El principal cultivo en Peine es la alfalfa, seguido de hortalizas, maíz y cereales. La estructura de la propiedad agrícola ha mantenido el patrón prehispánico de numerosas chacras y melgas de formas irregulares, con un sistema de riego comunitario.

Éste se desarrolla a una pequeña escala y su relevancia radica en sustentar formas de vida ancestrales asociadas a la cultura y sobrevivencia de la población altiplánica.

El presente proyecto será diseñado para el riego de melgas, donde su principal cultivo es el maíz.



Figura 2-6. Melga de cultivo de maíz
Fuente: Google imágenes

2.4. **NECESIDADES**

La escasez de agua en la comunidad debido a la discontinua distribución de la red local hace que los habitantes de Peine tengan que abastecerse de fuentes alternativas tales como las vertientes y canales que llegan al poblado, también la poca viabilidad de tener una conexión al sistema eléctrico en la zona de siembras, y la necesidad de cultivar maíz genera una idea para poder diseñar el sistema de riego por goteo solar, una excelente opción para hacer un uso eficiente del agua que proviene de los canales y de los fertilizantes en el cultivo.

Algunas plantas son muy sensibles al déficit hídrico, especialmente en la floración, por lo cual para evitar el estrés y tener un mejor crecimiento, es necesario tener un sistema de riego más eficiente en el uso de las aguas. El sistema de riego solar por goteo tiende a ser un método más amigable y eficiente que nos ayudaría a ahorrar agua y horas de trabajo al regar los cultivos.

Las zonas de cultivo en Peine al estar alejadas de las casas y de la red eléctrica local, no permiten el uso de artefactos o maquinas eléctricas por lo cual es necesario utilizar celdas fotovoltaicas que nos permitan obtener energía eléctrica mediante la captación de la energía solar.

En la presente imagen se aprecia la zona de cultivos o melgas, representada por la zona verde con árboles, en las cuales se planta maíz, alfalfa, zanahorias, entre otras verduras.



Figura 2-7. Zona de melgas en el Pueblo de Peine
Fuente: Google maps

2.5. **CONSIDERACIONES PARA EL SISTEMA DE RIEGO**

Para instalar un sistema de riego por goteo se debe tener en cuentas ciertas consideraciones.

2.5.1. Tipos de suelo

Se debe conocer como dato principal el tipo de suelo en el cual se encuentran los cultivos, ya que este importante dato será clave para determinar la cantidad de agua necesaria que habrá que destinar a los cultivos para su correcto crecimiento.

Existen principalmente tres tipos de suelos:

- Suelo arcilloso: Es aquel tipo de suelo, que por su estructura predomina la arcilla, que es un conjunto de partículas minerales muy pequeñas, a diferencia de otras como la arena o limo que también están presente en estos. Es decir, son suelos formados por granos finos que tienen la capacidad de retener o almacenar el agua formando charcos.
- Suelo franco: Es aquel tipo de suelo donde las cantidades de sus componentes se encuentran en proporciones óptimas o muy próximos a ella. Son suelos de elevada productividad agrícola, debido a su textura relativamente suelta, heredada de la arena, a su fertilidad procedente de los limos incluidos y al mismo tiempo con adecuada retención de humedad por la arcilla presente.
- Suelo arenoso: Es aquel tipo de suelo compuesto por una textura granular de hasta 50 cm de profundidad y a consecuencia de esto retiene pocos nutrientes, así como la capacidad de retención hídrica.

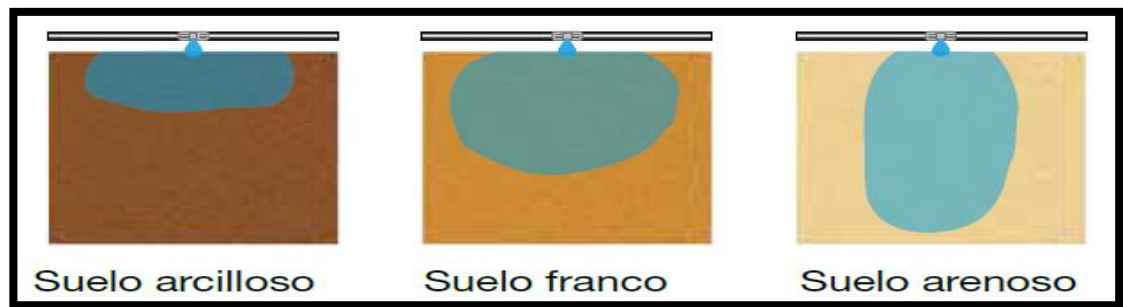


Figura 2-8. Tipos de suelo
Fuente: www.gestiriego.com

Según un estudio del Centro de información de Recursos Naturales (CIREN), en la zona geográfica donde se ubica el pueblo de Peine, en el altiplano del Desierto de Atacama, se conjuga la pérdida de temperatura al incrementarse la altitud y el aumento de precipitaciones por el efecto del “Invierno Altiplánico”. Tales componentes dan origen a la ocurrencia de suelos propios de ambientes semiáridos, en donde se presenta una vegetación tipo estepárica de altura. Los suelos así generados corresponden a Molisoles, correspondiente al tipo de suelo franco, caracterizados por presentar un horizonte superficial profundo, rico en materia orgánica.

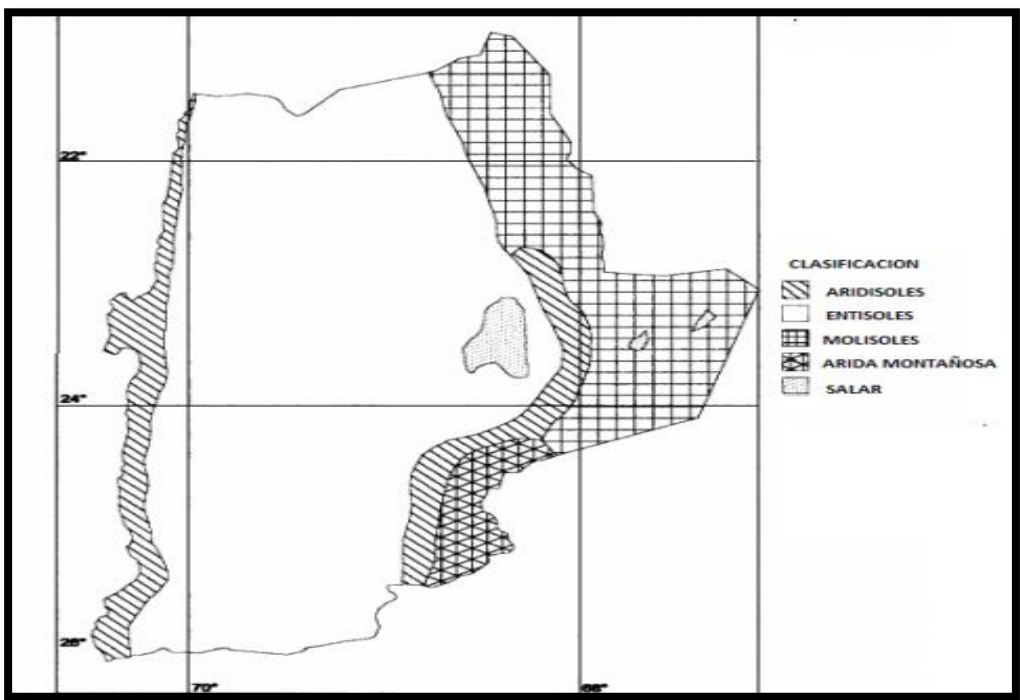


Figura 2-9. Distribución de suelos en la región de Antofagasta
Fuente: <http://bibliotecadigital.ciren.c>

CAPÍTULO 3: CALCULOS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO

3.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

Una de las variables más importantes para planificar el riego cultivos en una zona climática determinada y en un suelo con unas características determinadas, es la evapotranspiración del cultivo (ETc), que es la suma del agua consumida por la planta en la transpiración, y el agua evaporada desde el suelo.

La Evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua, y la Transpiración consiste en la vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales y su paso a la atmósfera. En conjunto la Evaporación y la Transpiración constituyen la Evapotranspiración (ETc).

La evaporación depende de los siguientes factores:

- Radiación solar
- Temperatura
- Humedad
- Presión atmosférica

La transpiración depende de los siguientes factores:

- El tipo de cultivo
- El grado de humedad del suelo
- El poder de evaporación de la atmosfera

3.1.1. Coeficiente de cultivo (Kc)

Para conocer la evapotranspiración del cultivo, se necesita conocer un segundo factor, el coeficiente de cultivo (Kc). Este mide la contribución del propio cultivo sobre las necesidades hídricas del mismo. Este factor denominado Kc depende de manera directa con el tipo de cultivo y el clima.

El Kc varía dependiendo de las características y las prácticas de cada cultivo. Estas se encuentran detalladas en el Boletín de Riego y Drenaje N° 56 de la FAO. Debido a las características y factores mencionados es que, para la determinación precisa de las

necesidades de riego de los cultivos, se deben emplear Kc que se encuentren desarrollados para una zona específica y validados para condiciones de cultivo que sean representativos. Según la guía para la determinación de los requerimientos de agua de cultivos de la FAO, el valor del coeficiente de cultivo (Kc) para el maíz, es de 1,20.

Tabla 3-1. Coeficientes únicos de cultivo (Kc)

Cultivo		K _{c ini} ¹	K _{c med}	K _{c fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
i. Cereales		0,3	1,15	0,4	
Cebada			1,15	0,25	1
Avena			1,15	0,25	1
Trigo de Primavera			1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
Trigo de Invierno	– con suelos congelados	0,4	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
	– con suelos no-congelados	0,7	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	
Maíz, (grano)			1,20	0,60,0,35 ¹¹	2
Maíz, (dulce)			1,15	1,05 ¹²	1,5
Mijo			1,00	0,30	1,5
Sorgo	– grano		1,00-1,10	0,55	1-2
	– dulce		1,20	1,05	2-4
Arroz		1,05	1,20	0,90-0,60	1

Fuente: Guía para la Evapotranspiración del cultivo, FAO.

3.1.2. Cálculo de agua para los cultivos mediante el método blaney-criddle

La ecuación de Blaney-Criddle es uno de los métodos más ampliamente utilizados para calcular las necesidades de agua de los cultivos. El método original de Blaney-Criddle recurre a la temperatura (t) y al porcentaje de horas de luz (p), como variables climáticas para predecir los efectos del clima sobre la evapotranspiración. Esto recibe el nombre de factor de uso consuntivo (F) o evapotranspiración de referencia (ET₀), el cual se expresa de la manera siguiente:

$$ET_0 = p (0.46 * t_1 + 8.13), \text{ Utilizando } ^\circ C$$

De acuerdo con el “Esquema de Cálculo de Necesidades de Agua de los Cultivos”, se calculará la evapotranspiración de referencia (ET₀), para lo cual se utilizará el método de Blaney-Criddle.

Necesitaremos tener en cuenta la temperatura promedio de cada mes para la zona en la cual se instalará el sistema de riego solar, datos obtenidos desde Accuweather.com, con las T° media para Peine, Antofagasta, latitud -23,6853 longitud -68,0600.

Tabla 3-2. Temperaturas mínimas, máximas y promedio de Peine

	T°c MIN	T°c MAX	T°c PROMEDIO
ENERO	7°	25°	16°
FEBRERO	7°	24°	15,5°
MARZO	6°	24°	15°
ABRIL	3°	23°	13°
MAYO	5°	22°	13,5°
JUNIO	1°	21°	11°
JULIO	2°	21°	11,5°
AGOSTO	-3°	15°	6°
SEPTIEMBRE	0°	18°	9°
OCTUBRE	2°	20°	11°
NOVIEMBRE	3°	22°	12
DICIEMBRE	4°	24°	14

Fuente: Accuweather.

Una vez obtenidos los datos de temperatura mínima y máxima podremos sacar la T° media en °C, la que nos permitirá obtener el valor final del (ET₀).

Tabla 3-3. Cálculo de ET₀, según T° media y % de horas de luz

Datos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T° media en °C (t)	16	15,5	15	13	13,5	11	11,5	6	9	11	12	14
% horas de luz (p)	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24	0.24	0.26	0.27	0.29	0.3	0.31
(ET ₀)	4,8	4,4	4,2	3,6	3,6	3,1	3,2	2,8	3,3	3,8	4,0	4,5

Fuente: elaboración propia

Obtenido el factor de uso consuntivo referencial (ET₀), podremos obtener el ET_c del cultivo utilizando el coeficiente (K_c) adecuado para el maíz, obtenido de la tabla 2-1 de coeficientes únicos de cultivo de la FAO.

Tabla 3-4. Resultados evapotranspiración enero-junio

Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
ET ₀ (mm/día)	4,8	4,4	4,2	3,6	3,6	3,1
ET _c (valor diario mm)	5,76	5,28	5,04	4,32	4,32	3,72
ET _c (mm/mes)	178,56	147,84	156,24	129,6	133,92	111,6

Datos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
ET ₀ (mm/día)	3,2	2,8	3,3	3,8	4,0	4,5
ET _c (valor diario mm)	3,84	3,36	3,96	4,56	4,8	5,4
ET _c (mm/mes)	119,04	104,16	118,8	141,36	144	167.4

Fuente: elaboración propia.

De las tablas anteriores, y como era de esperar, el mes más crítico resultó ser el mes de enero con una ET_c = 178,56 mm/mes. Ahora bien, teniendo en cuenta los datos meteorológicos de la zona respecto de las precipitaciones a lo largo del año, se procede al cálculo de las necesidades brutas de agua del cultivo.

3.2. CALCULO DE LAS NECESIDADES BRUTAS DE AGUA DEL CULTIVO

Un factor esencial en riego es el suelo, ya que independiente del sistema de riego que se disponga o que se quiera implementar las características del suelo determinaran cuando regar.

Entre las características del suelo más relevantes para el manejo del riego y que se deben tener en cuenta son: textura, estructura, porosidad, pedregosidad y permeabilidad.

3.2.1. Humedad aprovechable o lamina de riego

Teniendo en cuenta todos estos elementos podremos calcular otro valor importante que es la capacidad del suelo de retener el agua o humedad aprovechable (H).

Como las plantas toman el agua del suelo, los requerimientos hídricos se aplicarán a través del riego, por lo que se hace necesario calcular la lámina de riego que se aplicará al suelo. Ahora calculamos la lámina de riego (Lr) o (H) que depende del tipo de suelo y profundidad de las raíces del cultivo, cuyas relaciones se expresan mediante la siguiente formula:

$$H = \frac{\% CC - \% PMP}{100} * \text{prof} * (1 - \text{pred})$$

Donde:

- H = humedad aprovechable del suelo (cm).
- %CC = Contenido porcentual volumétrico a capacidad de campo (%).
- %PMP = Contenido porcentual volumétrico en punto de marchitez permanente (%).
- Prof = Profundidad del suelo que las raíces de la planta pueden penetrar.
- Pred = Pedregosidad, porcentaje de piedras presentes en el perfil.

Tabla 3-5. Humedad aprovechable para distintas clases texturales de suelo

Clase Textural	CC (%)	PMP (%)	Ha (cm/m)
Arenoso	9	4	8
Franco	14	6	12
Franco arenoso	22	10	17
Franco Arcilloso	27	13	19
Arcilloso arenoso	31	15	21
Arcilloso	35	17	23

Fuente: <http://www.gea.uchile.cl>

De acuerdo a la tabla 2-6 de la Humedad aprovechable para distintas clases texturales de suelo, obtenemos los valores de %CC y %PMP, la profundidad en este caso para las raíces será de 50 cm para el maíz y la pedregosidad del suelo un 0%.

$$H = \frac{\% 14 - \% 6}{100} * 50 * (1 - 0)$$

$$H = 4 \text{ cm}$$

3.2.2. Evapotranspiración de gotero (ETg)

Debido a que se hará riego por goteo, ahora debemos ajustar el humedecimiento a riego localizado, llamado evapotranspiración de gotero (Etg), lo que se hace por medio de la formula:

$$Etg = Etc * PAR$$

Donde:

- Etg: evapotranspiración de gotero
- Etc: evapotranspiración de cultivo
- PAR: porcentaje de área bajo riego

Con este método de riego sólo se humedece un 50% de la superficie del cultivo, esto se conoce como porcentaje de área bajo riego (PAR). Para nuestro ejemplo, aplicando la formula se obtiene:

Tabla 3-6. Resultados Etg enero-junio

Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
ETc (valor diario mm)	5.76	5.28	5.04	4.32	4.32	3.72
Etg (mm diario)	2.88	2.64	2.52	2.16	2.16	1.86

Datos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
ETc (valor diario mm)	3.84	3.36	3.96	4.56	4.8	5.4
Etg (mm diario)	1.92	1.68	1.98	2.28	2.4	2.7

Fuente: elaboración propia

3.2.3. Lámina Neta de Riego (Ln)

Ahora estimamos la lámina neta de riego mediante la expresión:

$Ln = Etg * Ir.$

Donde:

- Ln: lámina neta de riego
- Etg: evapotranspiración de gotero
- Ir: Intervalo de riego (2 días)

Tabla 3-7. Resultados Ln enero-junio

Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Etg (mm diario)	2.88	2.64	2.52	2.16	2.16	1.86
Ln (mm cada 2 días)	5.76	5.28	5.04	4.32	4.32	3.72

Datos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etg (mm diario)	1.92	1.68	1.98	2.28	2.4	2.7
Ln (mm cada 2 días)	3.84	3.36	3.96	4.56	4.8	5.4

Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Lámina bruta de riego (Lb)

Debido a que cuando aplicamos el riego hay pérdidas, que se deben a la eficiencia del riego (Ef), para los sistemas de riego por goteo se ha establecido este valor en Ef=0.90. Con este dato ajustamos la lámina de riego neta (Ln), mediante el cálculo de la lámina de riego bruta que considera las pérdidas del sistema mediante la expresión:

$$Lb = \frac{Ln}{Ef}$$

Donde:

- Lb: lámina bruta de riego
- Ln: lámina de riego neta
- Ef: eficiencia de riego

Tabla 3-8. Resultados Lámina bruta de riego enero - diciembre

Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Ln (mm cada 2 días)	5.76	5.28	5.04	4.32	4.32	3.72
Lb (mm cada 2 días)	6.4	5.86	5.6	4.8	4.8	4.13

Datos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Ln (mm cada 2 días)	3.84	3.36	3.96	4.56	4.8	5.4
Lb (mm cada 2 días)	4.26	3.73	4.4	5.06	5.3	6

Fuente: elaboración propia.

Este será el valor de la lámina de agua que aplicaremos al suelo mediante el riego, con el fin de restituir la capacidad de campo del mismo.

3.2.2. Textura del Suelo a Regar

La textura del suelo a regar es importante, debido a que da origen a la forma característica del bulbo mojado. En la siguiente tabla, se indican las distancias entre goteros y caudales de goteros recomendados para distintos tipos de suelos. Que, para el caso del suelo franco de nuestro terreno, se tiene:

- Distancia entre goteros: 1 metro
- Caudal Gotero: 2 litros/hora

Tabla 3-9. Recomendaciones de distancia y caudal de goteros

Caudal del gotero ➡		1 l/h	2 l/h	4 l/h
Textura del suelo	 Fina (suelo arcilloso)	1.20	1.30	1.50
	 Media (suelo franco)	0.80	0.90	1.10
	 Gruesa (suelo arenoso)	0.40	0.50	0.75

Fuente: agrohuerto.com

3.2.3. Esparcimiento de la Plantación y líneas de goteros

El esparcimiento de la plantación indica la distancia entre hileras de plantas y la distancia de las plantas sobre las hileras. Las distancias de plantación dependen de la especie y tipo de planta, y que de acuerdo con el maíz se han adoptado los siguientes valores:

- Distancia entre hileras: 1 m
- Distancia entre plantas: 0.125 m

En general, las líneas de goteros o tuberías laterales se colocan a lo largo de cada hilera de plantas, y la mayoría de los cultivos necesitan sólo una línea por hilera.

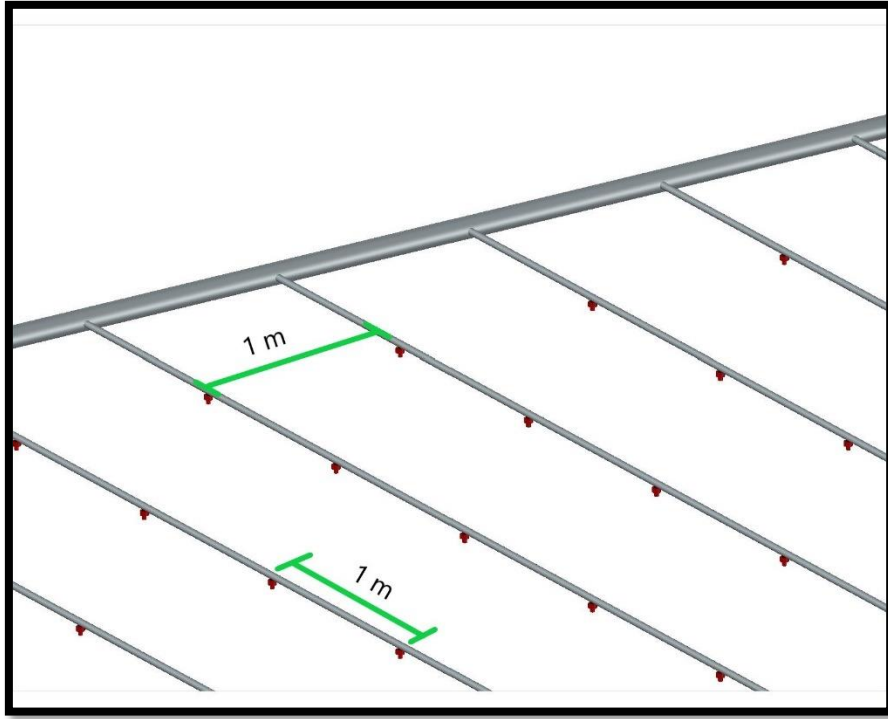


Figura 3-1. Líneas de riego
Fuente: elaboración propia

3.2.4. Tasa de aplicación del Riego por Goteo (Trg)

La tasa de aplicación del riego por goteo viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{Trg} = \frac{qg}{dl * dg}$$

Donde:

- Trg = Tasa de aplicación del riego por goteo (mm/hora)
- qg = Descarga del gotero (l/hora).
- dl = Distancia entre líneas de goteros o laterales (m).
- dg = Distancia entre goteros (m)

$$\mathbf{Trg} = \frac{2 \left(\frac{l}{hr}\right)}{1*1}$$

$$\mathbf{Trg} = 2 \frac{mm}{hr}$$

Tiempo de Riego (T)

Ahora, para operar el sistema necesitamos conocer el tiempo necesario para aplicar la lámina bruta de riego (Lb) y se hace mediante la expresión:

$$T_{rt} = \frac{Lb}{Trg}$$

T= 6.4/2 = 3.2 horas; de donde se concluye que la lámina bruta de riego se aplicaría en 3.2 horas, puesto que el sistema dotará Trg = 2 mm/hora. Como el intervalo de riego (Ir) es de 2 días, el riego se repetirá cada 2 días, para restituir el agua consumida por el cultivo y factores ambientales en dicho período.

Tabla 3-10. Resultados T enero – diciembre.

Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Lb (mm cada 2 dias)	6.4	5.86	5.6	4.8	4.8	4.13
T (horas)	3.2	2.93	2.8	2.4	2.4	2.06

Datos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Lb (mm cada 2 dias)	4.26	3.73	4.4	5.06	5.3	6
T (horas)	2.13	1.86	2.2	2.53	2.65	3

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados anteriores, el tiempo de riego necesario para el cultivo de Maíz en la zona de Peine para el mes de enero será de 3.2 horas, el cual corresponde al tiempo de riego de los goteros o la cantidad de horas que operan durante un día de riego.

3.2.5. Caudal necesario

En consideración a lo anterior, se eligieron goteros de 2 l/hora, los cuales irán inmersos en una tubería lateral de 16 mm de diámetro y 30 metros de largo, por lo que el caudal total a entregar por los goteros viene dado por la siguiente expresión:

$$Ql = n_g * q_g$$

Donde:

n_g = número de goteros en 30 metros de tubería lateral = 30
 q_g = descarga de gotero = 2 l/hora

$$Ql = 30 * 2$$

$$Ql = 60 \text{ litros / hora}$$

Por otra parte, el número de líneas de tuberías laterales en la unidad es de 31, por lo tanto, se tiene que el caudal total que necesita ser bombeado por la bomba para cumplir con los requerimientos de agua necesarios para el debido y correcto crecimiento del maíz es de:

$Ql = 60 \text{ litros/hora} * 31 \text{ laterales}$
 $Ql = 1860 \text{ litros/hora}$
 $Ql = 0,516 \text{ litros/segundo}$

A continuación, en la siguiente tabla, se presentan los valores obtenidos a lo largo del año.

Tabla 3-11. Requerimientos necesarios durante el año para el maíz.

Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
H	4	4	4	4	4	4
Lb	6.4	5.86	5.6	4.8	4.8	4.13
Trg	2	2	2	2	2	2
Trt	3.2	2.93	2.8	2.4	2.4	2.06

Datos	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
H	4	4	4	4	4	4
Lb	4.26	3.73	4.4	5.06	5.3	6
Trg	2	2	2	2	2	2
Trt	2.13	1.86	2.2	2.53	2.65	3

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- H = Lámina de agua neta a reponer en cada riego (cm)
- Hr = Altura de Lámina de agua Bruta o Real de riego (mm)
- Trg = Tasa de aplicación del Riego por Goteo (mm/hr)
- Trt = Tiempo de Riego total de los Goteritos, o la cantidad de horas que operan durante un día de riego.

3.3. CÁLCULOS PARA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

Para dimensionar el sistema de bombeo, se parte del cálculo del mes más crítico, vale decir, el mes donde las necesidades de agua son mayores, y que, según los cálculos realizados de acuerdo con el caudal y tiempo de riego necesario para el cultivo del maíz, resultó ser el mes de enero. El paso siguiente, será el cálculo de la altura dinámica total de la bomba para poder seleccionar un equipo adecuado para nuestro sistema de riego fotovoltaico.

Además, ya obtenida el área de riego y sus dimensiones, se calculará el total de metros de tubería necesarios para instalar los goteros.

3.3.1. Cálculos para selección de bomba centrífuga

Selección de bomba para estanque en altura

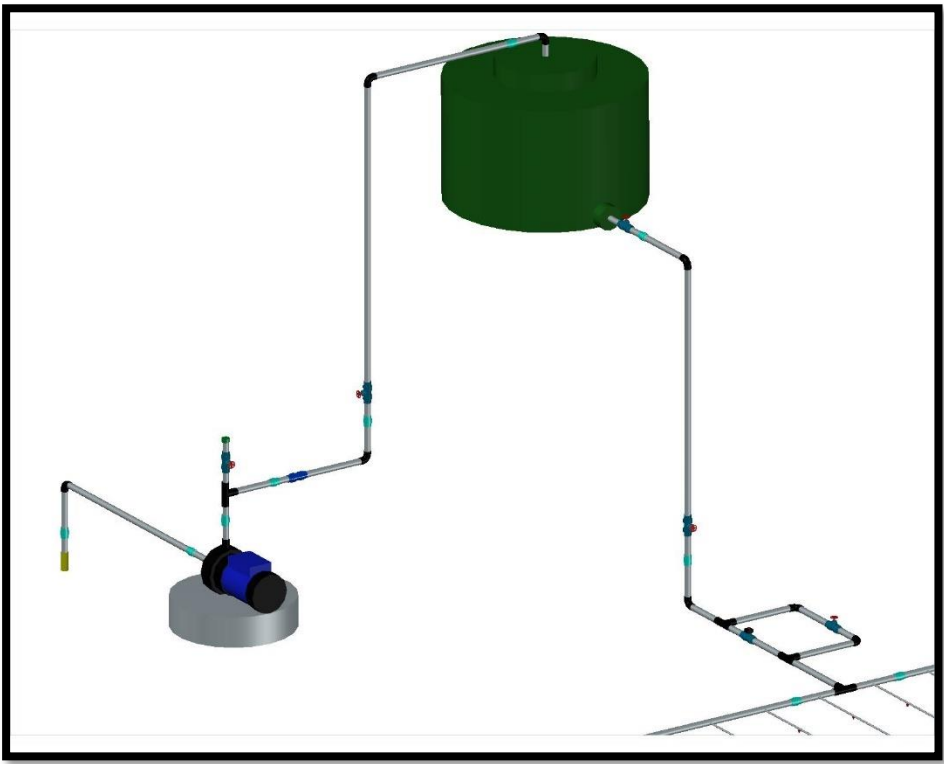


Figura 3-2. Diseño propuesta N°1
Fuente: elaboración propia

Condiciones de operación

Fluido: agua		
Cantidad de bombas:	1	
Caudal:	1.83	m3/h
Temperatura liquido:	20	°C
Presión de vapor del agua a 20°	0.24	mH2O
Elevación	2.420	msnm
Elevación succión	1	m
Elevación descarga	6	m
Eficiencia hidráulica	65	%

SUCCION

Diámetro nominal:	2’’ o 50 mm
Material tubería:	PVC
Diámetro exterior:	50 mm
Espesor tubería:	2.4 mm
Clase:	10
Diámetro interior:	45.2 mm
Coeficiente Hazen Williams PVC:	150
Caudal:	1.83 m3/h
Longitud de tubería:	6 m

Coeficiente de perdida de carga por accesorios

Válvula de pie:	100
Codo 90:	30

Reducción:

30

$$\text{Longitud equivalente} = \frac{\text{Diametro interior} * (\text{acc1} * \text{LE} + \text{acc2} * \text{LE} + \dots)}{1000}$$

Longitud equivalente accesorios en succión (m): 7.2 m

Ocupando la ecuación de Hazen Williams para establecer las pérdidas de cargas:

$$H_f = L * \frac{10.679}{C^{1.852}} * \frac{Q^{1.852}}{D^{4.87}}$$

Donde:

H_f: pérdida de carga (m)

L: longitud de la tubería (m)

C: Coeficiente de Hazen Williams

Q: caudal volumétrico (m³/s)

D: diámetro interno de la tubería (m)

Reemplazando los valores para nuestro caso con los datos obtenidos se tiene:

$$H_f = 6 * \frac{10.679}{150^{1.852}} * \frac{0.0005138889^{1.852}}{0.0452^{4.87}}$$

Perdida primaria en tubería (m) H_f = 0.017

$$H_f = 7.2 * \frac{10.679}{150^{1.852}} * \frac{0.0005138889^{1.852}}{0.0452^{4.87}}$$

Perdida secundaria accesorios (m) H_f = 0.020

Obtenidas las perdidas primarias y secundarias, se podrá calcular el total de la altura dinámica de succión con la siguiente formula:

Altura dinámica total = pérdidas primarias + pérdidas secundarias + altura de succión

Altura dinámica total de succión = 0,017 + 0,020 + 1

Altura dinámica total de succión = 1,037 (m)

DESCARGA

Diámetro nominal	2’’ o 50 mm
Material tubería	PVC
Diámetro exterior	50 mm
Espesor tubería	2.4 mm
Clase	10
Diámetro interior	45.2 mm
Coefficiente Hazen Williams PVC	150
Caudal	1.83 m3/h
Longitud de tubería	8 m

Coefficiente de perdida de carga por accesorios

Codo 90	30 * 3
Reducción	30
Válvula de retención	100
Válvula de bola	8

Longitud equivalente accesorios en succión (m) **8.8 m**

Ocupando la ecuación de Hazen Williams para establecer las pérdidas de cargas:

$$H_f = L * \frac{10.679}{C^{1.852}} * \frac{Q^{1.852}}{D^{4.87}}$$

Donde:

H_f: pérdida de carga (m)

L: longitud de la tubería (m)

C: Coeficiente de Hazen Williams

Q: caudal volumétrico (m³/s)

D: diámetro interno de la tubería (m)

Reemplazando los valores para nuestro caso con los datos obtenidos se tiene:

$$H_f = 8 * \frac{10.679}{150^{1.852}} * \frac{0.0005138889^{1.852}}{0.0452^{4.87}}$$

Pérdida primaria en tubería (m) H_f = 0.020

$$H_f = 8.8 * \frac{10.679}{150^{1.852}} * \frac{0.0005138889^{1.852}}{0.0452^{4.87}}$$

Pérdida secundaria accesorios (m) H_f = 0.025

Obtenidas las pérdidas primarias y secundarias, se podrá calcular el total de la altura dinámica de descarga con la siguiente formula:

Altura dinámica total = pérdidas primarias + pérdidas secundarias + altura de descarga

Altura dinámica total de descarga = 0.020 + 0.025 + 6

Altura dinámica total de descarga = 6.045 (m)

Altura dinámica total de la bomba = altura dinámica total de succión + altura dinámica total de descarga + altura geodésica

Altura dinámica total de la bomba = 1.036 m + 6.045 m + 6 m

Altura dinámica total de la bomba = 13.081 m

Con los datos obtenidos ya podemos seleccionar una bomba para el correcto bombeo del agua, desde el canal hacia el estanque, de acuerdo al caudal y altura manométrica de funcionamiento que obtuvimos.

El caudal mínimo para la bomba será de 0.516 litros/segundo (1.85 m³/hora), mientras la altura manométrica necesaria para seleccionar la bomba será de 13.081 metros.

Según las especificaciones técnicas de bombas centrifugas en la página de enertik.cl, la bomba necesaria para cumplir con los requerimientos del sistema corresponde al modelo BSQB-47-500-48V bomba solar de superficie.



Figura 3-3. Bomba solar de superficie

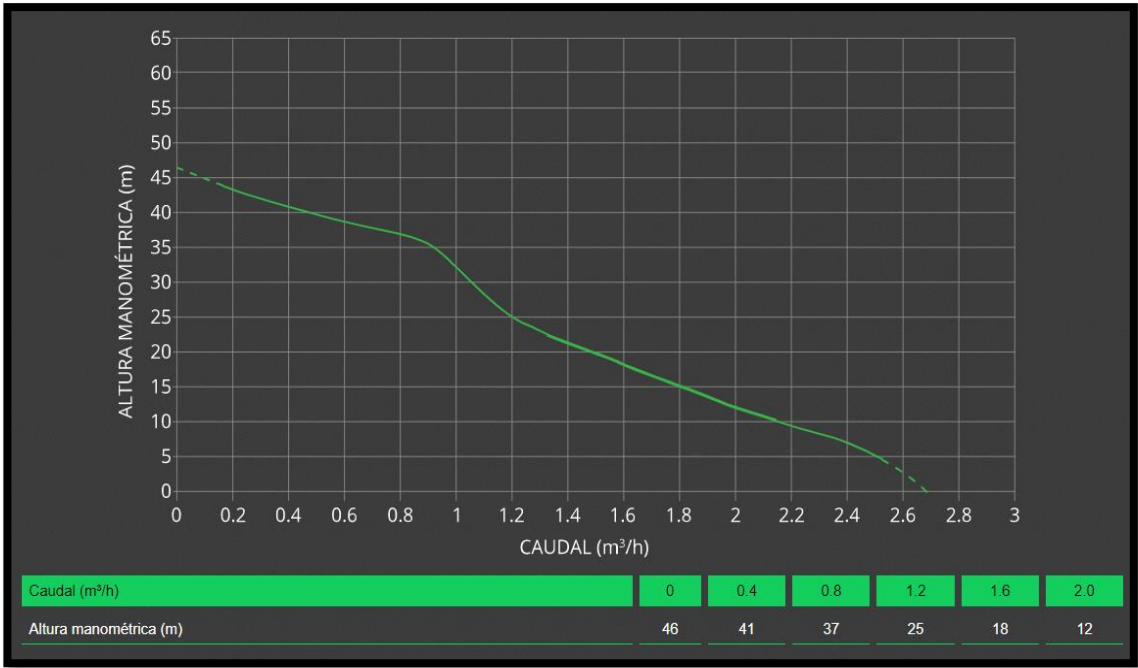
Fuente: www.enertik.cl

Tabla 3-12. Tabla especificaciones técnicas bomba solar

Modelo	BSQB-47-500-48V
Tipo	De superficie - Centrífuga
Altura manométrica máxima (m)	46
Altura de aspiración (m)	6 ~ 8
Especificaciones eléctricas	
Tensión nominal	48VCC
Potencia	500W
Potencia solar mínima	650W
Voltaje mínimo (Vmp)	60VCC
Voltaje máximo (Voc)	100VCC
Conexión a 220VCA [grupo electrógeno / red eléctrica] (opcional)	Si
Paneles solares recomendados	
Modelo	PS-90
Potencia total	720W
Cantidad de paneles (en serie)	8 x 90W (4 en serie x 2 en paralelo)
Caudal	
Caudal máximo (m³/h)	3.3

Fuente: www.enertik.cl

Tabla 3-13. Curva y tabla de rendimiento bomba solar



Fuente: www.enertik.cl

Según la curva de rendimiento de la bomba y la altura dinámica total calculada de 13 metros, la bomba tendrá un caudal de 1.8 m³/hora, con lo cual para satisfacer la demanda de agua necesaria para llenar un estanque de 6000 litros será necesario tenerla activa durante 3,3 horas.

3.3.2. Cálculo de tuberías

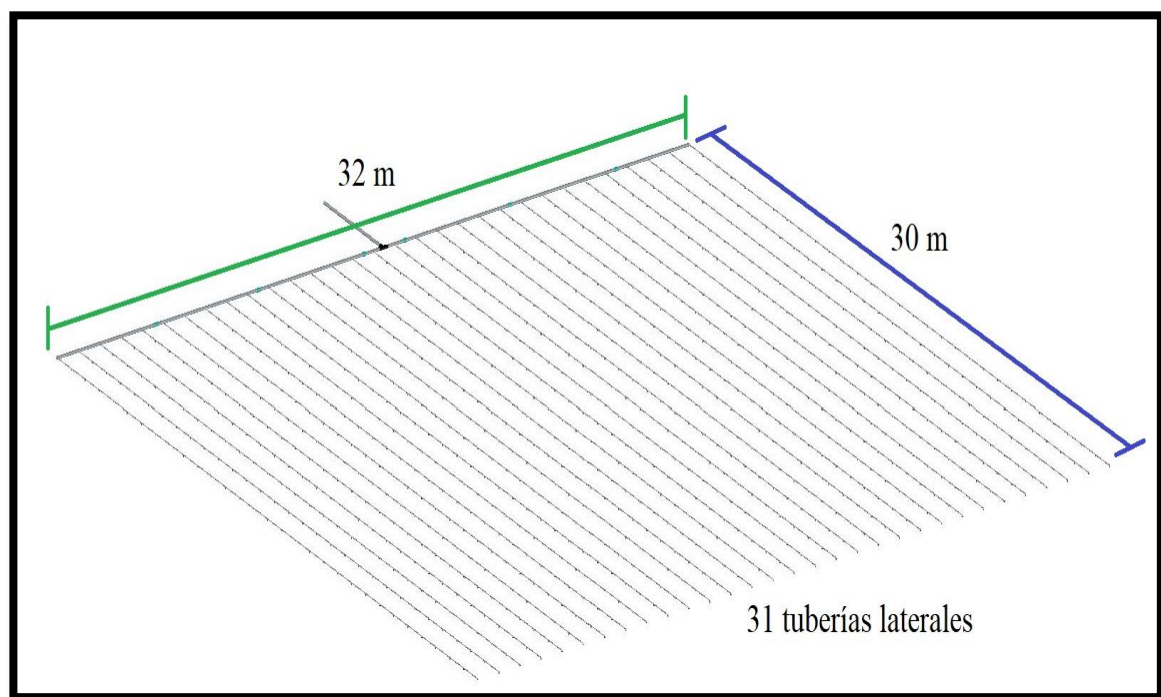


Figura 3-3. Tuberías sistema de riego
Fuente: elaboración propia.

Se necesitará una tubería principal de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 32 metros de largo, en la cual irán inmersas 31 tuberías de polietileno de 16 mm de diámetro y 30 metros de largo, se escogió polietileno como material para las tuberías de riego ya que aporta mayor ligereza, flexibilidad y bajo costo.

Tubería PVC principal: 32 metros

Tuberías PE laterales: 31 * 30m = 930 metros ≈ 950 metros

3.3.3. Estimación de materiales de torre estanque

Para poder tener un correcto funcionamiento en el sistema de riego, el estanque donde se almacene el agua deberá estar a cierta altura, como promedio se dio una altura de 4 metros.

Para esto se deberá construir una estructura metálica en forma de torre para soportar el peso del estanque con agua.

Materiales:

- 4 tubular cuadrado 100x100x3
- 14 tubular rectangular 50x30x2
- 5 kilos de soldadura
- 8 sacos de cemento
- Medio cubo de arena
- Medio cubo de ripio
- 2 galones de pintura anticorrosiva
- 2 galones de esmalte sintético

Se estimaron los materiales y un costo aproximado con respecto a una construcción ya materializada anteriormente, teniendo en cuenta un aproximado de precio a cada material y el costo de traslado hacia la zona donde se realiza el sistema de riego.



Figura 3-4. Ejemplo de torre para estanque
Fuente: elaboración propia.

3.4. CÁLCULOS DE CONSUMO Y SELECCIÓN DEL EQUIPO FOTOVOLTAICO

En el caso de una instalación de energía solar fotovoltaica off-grid (aislada de la red), es fundamental un correcto dimensionamiento para poder abastecer con garantías la demanda energética que tengamos.

Se debe tener en cuenta los siguientes datos para poder calcular los equipos de la instalación fotovoltaica:

- Potencia unitaria: todos los equipos que consumirán energía en la instalación de riego, conocer su potencia que vendrá indicada en las especificaciones técnicas del equipo expresada en Wattios (W)
- Horas de uso de los equipos: conocer las horas al día en que los equipos estarán funcionando.
- Ubicación geográfica: la ubicación de la instalación es importante para poder calcular los Kwh de insolación que recibe la zona y las horas de sol peak que tiene.

Consultados los datos desde la página power.larc.nasa.gov obtenemos que la irradiancia solar peak obtenida por un panel solar con inclinación a su latitud, por día es alrededor de 7 horas.

-BEGIN HEADER-													
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Climatology Climatologies													
30-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Climatologies (January 1990 - December 2020)													
Location: Latitude -23.6119 Longitude -68.0048													
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2677.39 meters													
Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999													
Parameter(s):													
EQUIV_NO_SUN_CONSEC_MONTH	SRB V4/CERES SYN1deg Equivalent No-Sun Days Over A Month Period (Days)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_HORIZONTAL	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance for Equator Facing Horizontal Surface (kw-hr/m^2/day)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_LAT_MINUS15	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance for Equator Facing Latitude Minus 15 Tilt (kw-hr/m^2/day)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_LATITUDE	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance for Equator Facing Latitude Tilt (kw-hr/m^2/day)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_LAT_PLUS15	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance for Equator Facing Latitude Plus 15 Tilt (kw-hr/m^2/day)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_VERTICAL	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance for Equator Facing Vertical Surface (kw-hr/m^2/day)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_OPTIMAL	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance Optimal (kw-hr/m^2/day)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_OPTIMAL_ANG	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance Optimal Angle (Degrees)												
SI_EF_TILTED_SURFACE_OPTIMAL_ANG_ORT	SRB V4/CERES SYN1deg Solar Irradiance Tilted Surface Orientation (N/S Orientation)												
-END HEADER-													
PARAMETER	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
EQUIV_NO_SUN_CONSEC_MONTH	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-999.00
SI_EF_TILTED_SURFACE_HORIZONTAL	8.81	8.08	7.39	6.25	5.00	4.46	4.69	5.72	7.01	8.08	9.03	9.21	6.97
SI_EF_TILTED_SURFACE_LAT_MINUS15	8.60	8.12	7.68	6.77	5.58	5.06	5.28	6.29	7.42	8.23	8.89	8.93	7.23
SI_EF_TILTED_SURFACE_LATITUDE	7.86	7.84	7.85	7.37	6.36	5.89	6.09	7.00	7.80	8.13	8.24	8.05	7.37
SI_EF_TILTED_SURFACE_LAT_PLUS15	6.81	7.13	7.57	7.55	6.77	6.39	6.55	7.32	7.74	7.58	7.24	6.87	7.12
SI_EF_TILTED_SURFACE_VERTICAL	1.85	2.46	3.71	5.01	5.22	5.27	5.25	5.31	4.44	2.99	1.98	1.74	3.76
SI_EF_TILTED_SURFACE_OPTIMAL	8.81	8.12	7.85	7.55	6.82	6.52	6.64	7.34	7.83	8.25	9.03	9.21	7.83
SI_EF_TILTED_SURFACE_OPTIMAL_ANG	0.00	6.50	21.50	37.00	46.50	51.00	49.00	42.50	29.00	12.50	0.00	0.00	-999.00
SI_EF_TILTED_SURFACE_OPTIMAL_ANG_ORT	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Figura 3-5. Datos con la información solar del lugar de instalación
Fuente: power.larc.nasa.gov

3.4.1. Cálculo de consumo estimado

Establecemos para el caso de nuestro sistema de riego, los siguientes equipos necesarios que consumirán energía, donde se calcula el consumo en watts (W) de cada equipo y la duración de funcionamiento de la bomba, que según nuestros cálculos fue 3.3 hora de tiempo de riego, con el cual para este caso usaremos una aproximación a 4 horas para tener un margen favorable.

- Bomba centrífuga: 4 horas * 500 W = 2000 W

El consumo total estimado para nuestro sistema de bombeo solar:

Total consumo estimado por día = 2000 W día

Aplicamos un rendimiento de la instalación del 80% para calcular la energía total necesaria para abastecer la demanda:

Energía total necesaria = 2000 / 0,80 = 2500 W/día

3.4.2. Cálculo del número de paneles solares

Datos y requerimientos:

- Latitud: S 23° 43' Longitud: O 68°4'
- Horas de sol peak: 7 horas
- Consumo diario: 2500 W

Cálculo de paneles fotovoltaicos:

Horas de sol peak (Hsp): 7 horas

Eficiencia regulador de carga (Erc)

Consumo diario: 2500 W

MPPT: 97% PWM 75%

$$\text{Potencia total de paneles (Ptmax)} = \frac{\text{Cdia (W)}}{\text{Erc} * \text{HSP (horas)}} = \frac{2500 \text{ W}}{6,79} = 368,2 \text{ Wp}$$

$$\text{Cantidad de paneles} = \frac{\text{Ptmax}}{\text{Pmax}} = \frac{370 \text{ Wp}}{120 \text{ W}} = 3,08 \approx 4 \text{ Paneles}$$

Se ocuparán 4 paneles de 120 Wp para nuestro sistema fotovoltaico, los cuales, para el mejor aprovechamiento de la luz solar, deberán estar inclinados a 23°, equivalente a la latitud de la zona donde estarán instalados.

Con los datos obtenidos se seleccionaron 4 paneles solares de 120 W de la marca Enertik.

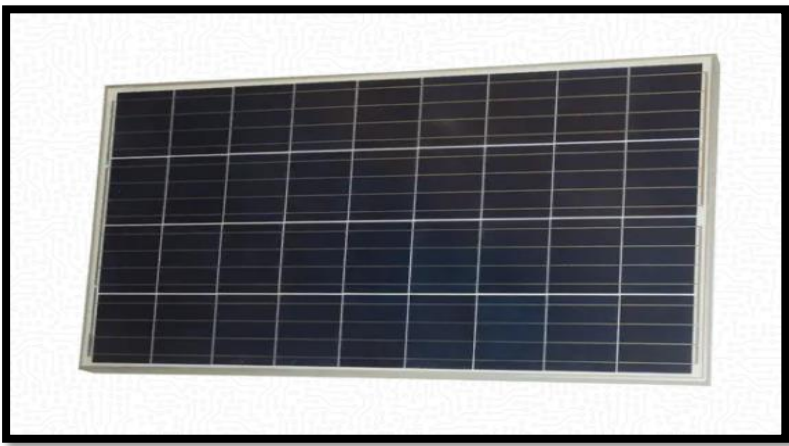


Figura 3-6. Panel solar 120 W
Fuente: www.enertik.cl

3.4.3. Calculo banco de baterías

Consumo diario: 2500 W

Autonomía (Au): 2 días

Profundidad de descarga (DOD): 50% $\Rightarrow$ 0.5

Tensión de batería (V): 12 V

$$\text{Capacidad banco de baterías (Ctw)} = \frac{CD * AU}{DOD} = \frac{2500 * 2}{0.5} = 10000 \text{ Wh}$$

$$\text{Capacidad banco baterías (C}_{\text{tam}}) = \frac{C_{\text{tw}}}{V_u(V)} = \frac{10000 \text{ Wh}}{12V} = 833,3 \text{ Ah}$$

$$\text{Capacidad baterías (Cuam)} = \frac{C_{tam}}{N_{bs}} = \frac{833}{4} = 208 \text{ Ah}$$

Se ocuparán 4 baterías de 220 Ah

Obtenidos los resultados, se seleccionaron 4 baterías de 220 Ah 12V de la marca Victron Energy.



Figura 3-7. Batería Victron GEL 12V 220 Ah
Fuente: www.induventa.cl

Como la bomba solar funciona a 48V, las baterías deberán estar conectadas de tal forma que sumen sus voltajes y conserven sus amperios, a esto se le llama conexión en serie, tal como se muestra en la siguiente imagen.

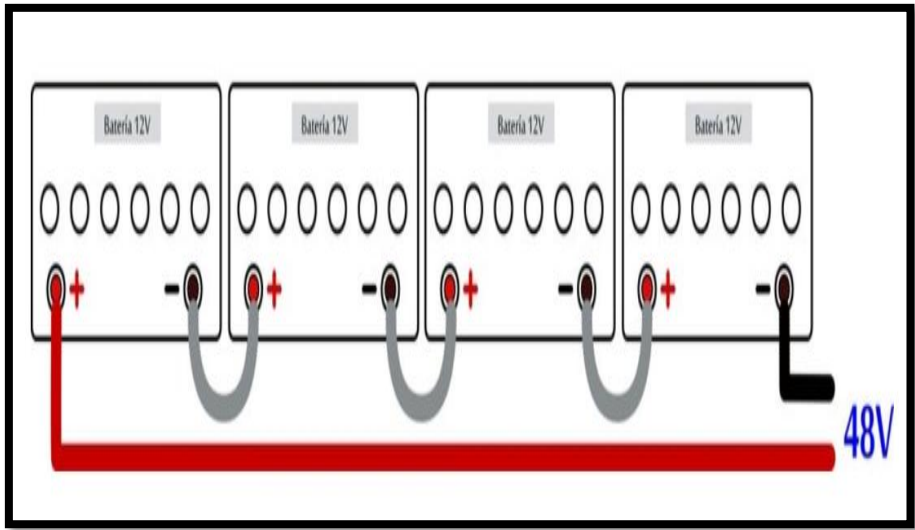


Figura 3-8. Conexión baterías para 48v
Fuente: autosolar.es

Teniendo en cuenta que la batería del sistema de riego es de 220 Ah y los paneles solares son de 120 W para saber cuánto tiempo se demorará en cargar la batería, debemos convertir la capacidad del panel solar, de Watt a Amper, dividiendo la capacidad del panel solar por 15.

$$\text{Tiempo de carga de una batería} = \frac{\text{Potencia panel (W)}}{15} * HPS = \frac{120 (W)}{15} * 7 = 56 \text{ Ah}$$

Según los cálculos cada panel entregará 56 Ah por día, teniendo 4 de la misma capacidad obtendremos 224 Ah día para cargar una batería.

3.4.4. Selección regulador MPPT de carga

Este se encargará de controlar la carga que llegue a las baterías, así también la descarga y evitar cargas o descargas excesivas.

Las intensidades máximas de entrada y salida del regulador dependerán de la corriente máxima que pueda producir nuestro sistema fotovoltaico para la entrada y la corriente máxima de las cargas para la salida.

Para seleccionar un regulador adecuado se debe dividir la potencia total de los paneles por la tensión de la batería y obtendremos la intensidad máxima de carga.

$$\text{Intensidad máxima de carga} = \frac{\text{Potencia total paneles}}{\text{Tensión (V) batería}}$$

Teniendo en cuenta que ocuparemos 4 paneles de 120 W nos da un resultado de 480 W como potencia máxima de los paneles, y se ocuparan baterías de 12V por lo cual ya tenemos los dos valores para proceder al cálculo.

$$\text{Intensidad máxima de carga} = \frac{480 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 40 \text{ Amperios}$$

Se necesitará un regulador solar de 48 V 40 A para que nuestro sistema fotovoltaico funcione sin inconvenientes.

Con los datos ya obtenidos seleccionamos el siguiente regulador MPPT

REGULADOR DE CARGA EPEVER MPPT 40 A 12/24/36/48 V



Figura 3-9. Regulador de carga MPPT
Fuente: www.casaedison.cl

3.5. MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL SISTEMA DE RIEGO FOTOVOLTAICO

Para que un sistema de riego por goteo fotovoltaico tenga un correcto funcionamiento, requiere que este sea inspeccionado periódicamente con el fin de detectar fallas que afecten en los procesos de riego, detectar fugas en las líneas, obstrucción de goteros, falla en los equipos eléctricos, o cualquier otro imprevisto que a largo plazo genere un funcionamiento defectuoso del sistema.

Es por esto que, se debe realizar un plan de mantenimiento para que el sistema de riego funcione de forma correcta y se vea un impacto positivo en el crecimiento y rendimiento de nuestros cultivos.

3.5.1. Mantenimiento del sistema de aspiración, riego

Una de las primeras cosas que debemos tener en cuenta al inspeccionar el sistema, es la fuente de agua, ya que de esta se succionara el agua para el sistema de riego, esta debe estar libre de suciedades como algas, raíces, restos vegetales o algún elemento que pueda obstruir el ingreso del agua a la tubería de succión.

Válvula de pie: Al ser esta la pieza encargada de mantener el caudal y evitar el retorno de este y también de filtrar la suciedad que proviene del agua nos ayudará a evitar posibles obstrucciones en nuestra instalación, es por eso que es esencial hacerle una mantención y limpieza periódica para evitar un mal funcionamiento de nuestro sistema.



Figura 3-10. Válvula de pie obstruida
Fuente: sag.cl

Bomba de agua solar: las bombas de agua solares funcionan con una fuente de energía renovable y limpia, generalmente requieren de poco mantenimiento, al ser una bomba de tipo centrífuga, mensualmente se debe revisar el estado del equipo para ver si presenta fugas u obstrucciones dentro de esta en la parte donde va el rodete o impulsor.

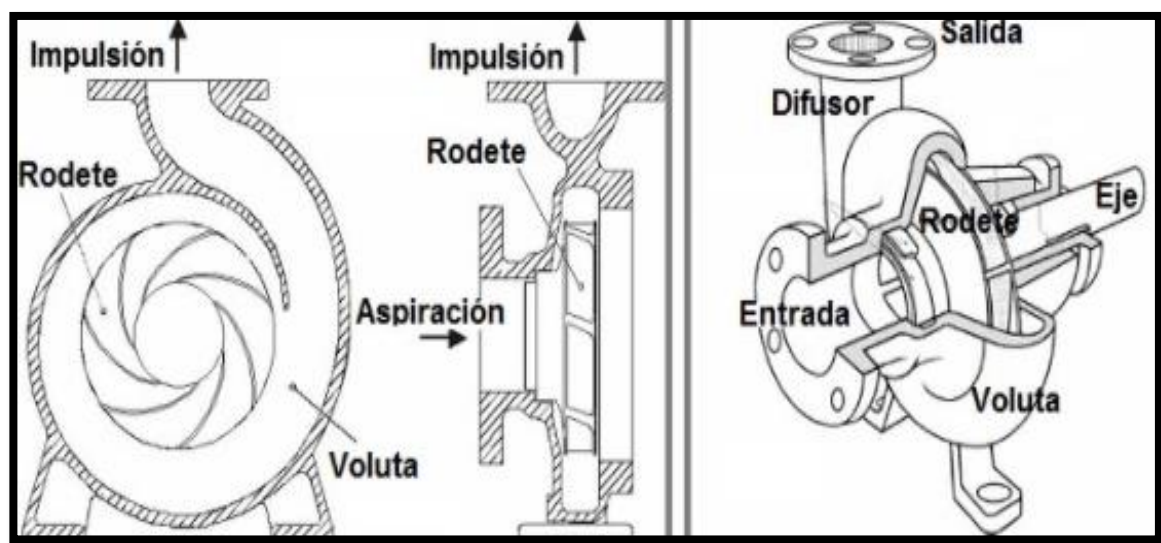


Figura 3-11. Partes principales de una bomba solar centrífuga
Fuente: ingemecanica.com

Emisores: La obstrucción de los emisores es uno de los principales problemas a los cuales debe enfrentarse el agricultor al manejar un sistema de riego localizado. El taponamiento de los emisores altera el normal abastecimiento de agua a los cultivos; disminuyéndolo y en casos graves puede llegar a suprimirlo, reduciendo así, la eficiencia del sistema de riego tecnificado, debido básicamente a alteraciones en los patrones de distribución y uniformidad de aplicación del agua riego.

Las mangueras y los goteros pueden llegar a acumular una cantidad importante de partículas sólidas al cabo de un tiempo. Debemos quitar las tapas de los finales y dejar correr el agua para que la suciedad salga de las mangueras.

Si en los goteros persiste la obturación debemos quitarlos y lavarlos con agua o aire a presión.

Es por esto que se debe realizar de forma periódica (mensual) una revisión y limpieza de las mangueras y goteros, aplicando agua oxigenada o ácido cítrico anhidro para limpiar las partículas que se han acumulado, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del sistema de riego.



Figura 3-12. Emisor obstruido por sales minerales
Fuente: portalfruticola.com

Válvula solenoide de riego: debido al constante trabajo de esta pieza es necesario revisarla periódicamente para asegurarse de que no esté obstruida o tenga fugas producto del desgaste de sus componentes, antes de revisar esta pieza se debe apagar el programador de riego y cortar el suministro de agua.

Para poder revisar la válvula se deben quitar los tornillos de la tapa para posteriormente retirarla, al sacar la tapa el diafragma se encontrará sobre el cuerpo de la válvula o pegado en la tapa.

Al examinar el diafragma y el sello, deben estar limpios y libres de arrugas, perforaciones o abolladuras, posterior a su examinación se debe lavar con agua limpia para poder eliminar los residuos que pudiera tener la pieza.

Al montar el diafragma y el resorte, este debe rebotar sin problemas cuando se comprime.

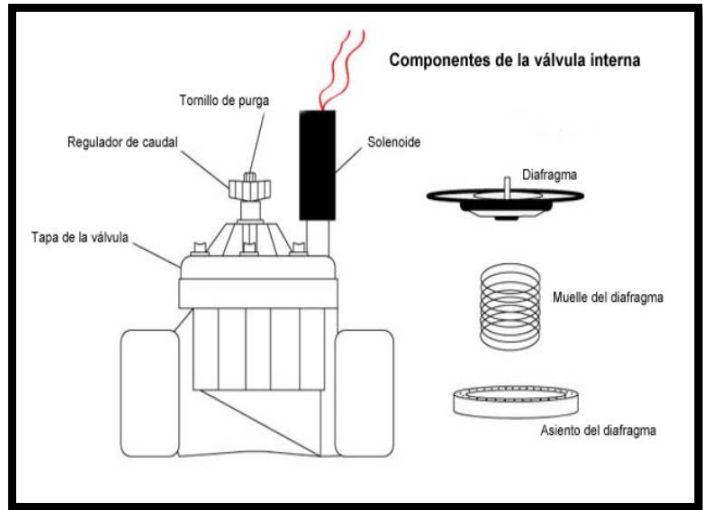


Figura 3-13. Componentes de una válvula solenoide de riego
Fuente: hunterindustries.com

3.5.2. Mantenimiento del sistema fotovoltaico

Modulo solar: al estar ubicados en una zona desértica es más probable que se acumule polvo y suciedad en los módulos FV, al igual que objetos como hojas de árboles, ramas y excremento de aves, que impedirán el ingreso de la energía solar en las celdas FV lo que generará una disminución en la energía eléctrica generada.

Para la limpieza de los paneles solares, primeramente, se debe tener en cuenta que el equipo este desconectado y sin funcionamiento, se debe utilizar abundante agua sin detergente o disolvente que puedan generar residuos, utilizar utensilios de limpieza con cerdas suaves, como por ejemplo esponjas o trapos de tela o algodón.



Figura 3-14. Limpieza de un panel solar

Fuente: energía.gob.cl

Batería solar: Las baterías de una instalación solar necesitan de un mantenimiento anual con el objetivo de mantener su buen funcionamiento y rendimiento. Para ello, es necesario controlar: temperatura de la estancia de las baterías, el estado de los bornes y de las conexiones.

La temperatura de lugar donde se encuentren instaladas las baterías influirá en su rendimiento y determinará su capacidad. Para funcionar de la mejor manera las baterías necesitan una temperatura lo más estable posible, alrededor de los 20°C. A temperaturas menores se irá perdiendo paulatinamente capacidad de carga, mientras que a mayores temperaturas se conseguirá que el electrolito se evapore de forma más rápida, con lo cual su mantenimiento deberá ser más frecuente.

Los bornes de la batería se deberán limpiar con un pañuelo seco y limpio antes de realizar las conexiones y de forma periódica una vez al año. Es muy importante no tocar a la vez con las manos los polos positivo y negativo de una batería solar. Será obligatorio hacer siempre la limpieza de los bornes de uno en uno para evitar cualquier accidente.

Se debe evitar que en los bornes se produzca una capa blanca de sulfatación, resultado del poco mantenimiento del nivel de electrolito y que perjudicaría en el contacto y paso de la corriente. Para ello se deberán rascar los bornes con un cepillo con pelos de latón hasta que queden completamente limpios. Para una mayor seguridad, en el momento de desconectar los bornes se debe empezar por

el polo negativo seguido del polo positivo. Mientras que para su conexión se deberá empezar por el polo positivo seguido del polo negativo.



Figura 3-15. Limpieza de una batería solar
Fuente: damiasolar.com

Tabla 3-14. Tabla de actividades de mantenimiento preventivo

Componente	Descripción	Frecuencia
Bomba solar centrífuga	Inspección de funcionamiento de la bomba, toma de temperatura, revisión de fugas, rodete y sellos	Mensual
Válvula de pie	Inspección y limpieza de impurezas presentes en la zona de succión y fuente de agua	Mensual
Emisores	Inspección y limpieza de mangueras y goteros posiblemente obstruidos por partículas o sales minerales	Mensual
Válvula solenoide de riego	Inspección y limpieza de los componentes y el interior de la válvula, asegurar que no existan anomalías tales como abolladuras o perforaciones en las piezas	Mensual
Modulo solar	Inspección y limpieza de partículas y polvo de las celdas fotovoltaicas	Mensual
Batería solar	Inspección y limpieza de las baterías solares, revisión de niveles de líquido y estado de los bornes	Semestral

CAPÍTULO 4: ESTIMACIÓN DE COSTOS

Los sistemas de riego solar generalmente tienen un alto costo de instalación inicial comparado con otras alternativas de riego, no obstante, a largo plazo se logra obtener un gran beneficio debido al bajo costo de mantención del sistema y gracias a que ocupa energía solar la cual es inagotable.

Se realizó la estimación de costos para las dos propuestas de riego solar, se consideraron los mejores componentes y equipos para poder tener un sistema de riego de calidad y que no presente fallas a futuro.

Los componentes eléctricos para el funcionamiento de los sistemas de riego son únicamente en base a uso de corriente continua, así se reduce el gasto de energía y se evita el uso de un inversor de corriente lo que generaría un gasto significativo en el costo del sistema.

A continuación, se presentan las estimaciones de costo para las dos propuestas de sistema de riego solar, siendo estos costos un aproximado, cotizado en distintas páginas y empresas de Chile al mes de agosto, todos los precios de componentes y equipos incluyen el impuesto al valor agregado (IVA) que corresponde a un 19% extra del valor correspondiente

Tabla 4-1. Estimación de costos

Ítem	Descripción	Marca	Cantidad	Precio unitario	Sub. Total
1 SISTEMA ELECTRICO					
	Panel solar policristalino 120 W	Enertik	4	53.300	213.200
	Regulador de carga MPPT 40 A	EPEVER	1	126.000	126.000
	Batería gel Victron 220 A	Victron	4	200.000	800.000
	Estructura soporta paneles	Bet Solar	1	119.990	119.990
	Dispositivo de protección contra sobretensiones	General	1	19.109	19.109
	Programador de riego I-DIAL	Rain	1	65.990	65.990
SUB-TOTAL					1.344.289
2 EQUIPO DE RIEGO					
	Bomba solar de superficie BSQB-25-500-48V + sensor de nivel de estanque	Enertik	1	488.019	488.019
	Gotero autocompensante 2 l/h	PCJ	930	150	139.500
	Codo pvc 2’’	Hidrosystem	8	3.975	31.800
	Tee pvc 2’’	Vinilit	6	1.660	9.600
	Tuberías laterales polietileno 16 mm	Vinilit	950 m	24.190 x 50 m	459.610
	Tubo pvc 50 mm	Vinilit	54 m	13.420 x 6 m	120.780
	Unión americana 2 ’’	Vinilit	16	4.500	72.000
	Válvula antirretorno PVC 2’’	Upvc	1	6.590	6.590
	Válvula de bola 2’’	Genebre	4	75.990	303.960
	Válvula solenoide 2’’ plus 160 con control/flujo	Rain	1	51.590	51.590
	Válvula pie con filtro 2’’	Stretto	1	17.590	17.590
SUB-TOTAL					1.701.039
3 OTROS GASTOS					
	Estanque vertical 6000 L	Amerplast	1	489.990	489.990
	Interruptor de nivel para estanque	Pgic	1	11.990	11.990
	Torre de estructura base para estanque (materia prima)			2.000.000	2.000.000
	Otros			100.000	100.000
SUB-TOTAL					2.601.980
COSTO TOTAL					5.647.308

CONCLUSIÓN

Debido a la privilegiada zona geográfica en la que se encuentra el lugar donde se desea instalar el sistema de riego fotovoltaico, existe una gran factibilidad para llevar a cabo la instalación, aprovechando el recurso solar, una fuente energética natural e inagotable.

Los sistemas de riego por goteo solar propuestos dan una solución a los pequeños agricultores, generando un ahorro de agua significativo, tecnificando y automatizando el sistema de riego, dándoles mayores libertades y permitiéndoles ahorrar tiempo y recursos hídricos a la hora del riego de cultivos.

En cuanto a las propuestas planteadas, y el estudio de las diferentes variables como tipo de suelo, temperatura del lugar, zona geográfica, estas cumplen satisfactoriamente las demandas solicitadas, haciendo posible instalar un sistema de riego por medio de energía solar en la zona de cultivos del Pueblo de Peine.

BIBLIOGRAFIA

1. Equipo de energía INDAP. (2018). Recurso solar y uso del explorador solar [en línea]. Sitio web: <<https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/ppt-3-recurso-solar.pdf?sfvrsn=0>> [Consulta:01 abril 2021]
2. AMPHOS. (2017). Estudio básico diagnóstico para desarrollar plan de gestión de riego en la región de Antofagasta. [en línea]. Sitio web: <<https://docplayer.es/63986488-Estudio-basico-diagnostico-para-desarrollar-plan-de-gestion-de-riego-en-la-region-de-antofagasta-informe-final.html>> [Consulta:02 abril 2021]
3. Sistema de información territorial rural SITRural (2016). Región de Antofagasta, provincia de El Loa, comuna de San Pedro de Atacama TURISMO [en línea]. Sitio web: <https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2020/03/San_Pedro_de_Atacama_turismo.pdf> [Consulta: 06 abril 2021]
4. Sistema de información integral de riego eSIIR (2021). Mapa catastro de infraestructura de riego [en línea]. Sitio web: < <https://esiir.cnr.gob.cl/>> [Consulta: 08 abril 2021].
5. Aprende con energía (2021). Uso de energía solar en Chile [en línea]. Sitio web: <<https://www.aprendeconenergia.cl/uso-de-energia-solar-en-chile/>> [Consulta: 10 abril 2021].
6. SUNFIELDS (2019). Energía fotovoltaica [en línea]. Sitio web: <<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/>> [Consulta: 16 abril 2021].

7. Grete, Mostny. Peine un pueblo atacameño. 1ra edición. Chile. Museo Nacional de Historia Natural. [en línea]. <<http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-58649.html>> [Consulta: 22 abril 2021].
8. Instituto de investigaciones agropecuarias (2000). Estimación de la demanda de agua en los cultivos [en línea]. Sitio web: <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/9851/CNR-0244.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Consulta: 08 mayo 2021].
9. Centro de información de recursos naturales CIREN (2016). Suelos II región de Antofagasta [en línea]. Sitio web: <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26222/CIREN-HUMED052-Suelos%20RII.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Consulta: 15 mayo 2021].
10. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura FAO (2019). Textura de suelos [en línea]. Sitio web: <http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm> [Consulta: 16 mayo 2021].
11. Instituto de investigaciones agropecuarias (2019). Riego y evapotranspiración [en línea]. Sitio web: <<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/6836/NR41961.pdf?sequence=11&isAllowed=y>> [Consulta: 22 mayo 2021].
12. FCFM Universidad de Chile (2016). Explorador solar para autoconsumo [en línea]. Sitio web: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/doc/Manual_Explorador_Solar.pdf> [Consulta: 22 mayo 2021].
13. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura FAO (2019). Evapotranspiración de cultivo [en línea]. Sitio web: <<http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>> [Consulta: 29 mayo 2021].

14. Fundación Chile (2011). Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano [en línea]. Sitio web: < <https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/cultivo-maiz-de-grano.pdf?sfvrsn=0> > [Consulta: 29 mayo 2021].
15. CONADI (2017). Como determinar; cuánto y cuándo regar [en línea]. Sitio web: <http://www.gea.uchile.cl/archivos/Como_determinar_cuando_y_cuanto_regar_Conadi.pdf> [Consulta: 05 junio 2021].
16. Ing. Juan Leonardo Chow (2021). Cálculos de requerimientos de riego [en línea]. Sitio web: <http://www.riego.elesteliano.com/ayuda/Fto2_Requerimientos_de_riego.htm> [Consulta: 06 junio 2021].
17. Lucia Muñoz, AgroHuerto (2020). Riego por goteo [en línea]. Sitio web: < <https://www.agrohuerto.com/riego-por-goteo-caudal-y-distancia-entre-goteros/> > [Consulta: 12 junio 2021].
18. Miguel Ángel Monge (2018). Prontuario de diseño hidráulico para riego por goteo [en línea]. Sitio web: <<https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/prontuario-diseno-hidraulico-riego-goteo-2a-parte>> [Consulta: 13 junio 2021].
19. Ingemecánica (2019). Cálculo de una instalación de riego por goteo [en línea]. Sitio web: <<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn207.html>> [Consulta: 19 junio 2021].
20. INTAGRI (2019). Diseño agronómico de sistemas de riego por goteo [en línea]. Sitio web: <<https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/diseno-agronomico-del-sistema-de-riego-por-goteo>> [Consulta: 20 junio 2021].

21. Pajón, Javier y Dávila, Juan Antonio (2000). Teoría básica para el diseño y cálculo de tuberías, elementos de máquinas y recipientes a presión [en línea]. Sitio web: < <https://www.aacademica.org/javier.pajon.permuy/8.pdf> > [Consulta: 26 junio 2021].
22. Ingemecánica (2019). Instalación solar fotovoltaica para el bombeo de agua para riego [en línea]. Sitio web: <<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn193.html>> [Consulta: 27 junio 2021].
23. Pirobloc (2019). Cálculo de pérdidas de carga [en línea]. Sitio web: <<https://www.pirobloc.com/blog-es/calculo-perdidas-carga/>> [Consulta: 03 julio 2021].
24. José Alonso Lorenzo, SUNFIELDS (2019). Manual de cálculo de instalación fotovoltaica aislada [en línea]. Sitio web: <<https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>> [Consulta: 10 julio 2021].