

2018-04

# DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DIMENSIONAMIENTO ADECUADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEO APLICADOS A RIEGO

NUÑEZ AHUMADA, EDUARDO ANDRES

---

<http://hdl.handle.net/11673/39950>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO – CHILE



“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA  
COMPUTACIONAL PARA EL DIMENSIONAMIENTO  
ADECUADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE  
BOMBEO APLICADOS A RIEGO”

EDUARDO ANDRÉS NÚÑEZ AHUMADA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO.

PROFESOR GUÍA:

PhD. RODRIGO BARRAZA VICENCIO.

ABRIL – 2018

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO  
SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO – CHILE**



**“DESARROLLO DE UNA  
HERRAMIENTA COMPUTACIONAL  
PARA EL DIMENSIONAMIENTO  
ADECUADO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS DE BOMBEO  
APLICADOS A RIEGO”**

**EDUARDO ANDRÉS NÚÑEZ AHUMADA**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO.**

**PROFESOR GUÍA: PhD. RODRIGO BARRAZA VICENCIO.**

**PROFESOR CORREFERENTE: JAIME ESPINOZA SILVA**

**ABRIL – 2018**

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecer a mis familiares en especial a mis padres, Luis y Nelly por haberme dado todas herramientas y apoyo necesario para terminar de manera exitosa la carrera de Ingeniería Civil Mecánica en esta universidad. Como no agradecer a mis grandes amigos que conocí en esta universidad como es el caso de Felipe Avaria, Felipe Echeverría, Eduardo Arce, Sebastián Flores, Eduardo Modinger y Nicolás Arce. Gracias por haberme acompañado y apoyado durante estos años. Permitiendo que este proceso se transformara en un profundo aprendizaje como persona, por eso creo que la esencia de la formación en la universidad es no solamente es la formación profesional, sino que también la formación como persona. Cumpliendo con la misión que Federico Santa María estableció y que es la razón de ser de esta casa de estudios, una institución con vocación social, de servicio, con una fuerte formación científica y tecnológica. En ese sentido los profesionales de esta universidad deben hacerse oír en la sociedad. Hay temas que serán claves en la discusión, la educación y la inequidad. Que mejor vocero de buenas causas que un Ingeniero de esta institución que fue fundada los propósitos que ya conocemos. Los problemas de la energía, del medio ambiente, del agua, la información y las comunicaciones, el desarrollo sustentable y amigable. Desarrollemos capacidad para ser voceros y poder dar respuesta si es que en algún momento somos interpelados, incluso por ese chileno humilde que quizás nunca este en la Universidad.

Finalmente quiero agradecer a profesores importantes en mi carrera universitaria, principalmente del Departamento de Ingeniería Mecánica y principalmente a quienes motivaron mi cambio de carrera y que me marcaron tanto en lo profesional como persona.

## RESUMEN

El bombeo de agua con energía solar se basa en la tecnología fotovoltaica (FV) que convierte la energía solar en energía eléctrica para hacer funcionar un motor acoplado a una bomba de agua con corriente continua o alterna. La selección de la tecnología y el dimensionamiento adecuado de los componentes del sistema es esencial para un funcionamiento estable y eficiente de un sistema de riego FV.

En este trabajo se desarrolló una plataforma computacional implementada en el software Engineering Equation Solver (EES) para el dimensionamiento adecuado de sistemas fotovoltaicos, para la operación de sistemas de riego tecnificado. El modelo numérico desarrollado incluye variables hidráulicas, eléctricas y meteorológicas en el proceso de simulación, en el cual se determina la factibilidad energética, así como distintas variables que sugieran una determinada prefactibilidad, como el ahorro, inyecciones y energía consumida desde la red. Los resultados entregados permiten al usuario tomar una decisión sobre la potencia fotovoltaica a instalar teniendo en cuenta dos modelos energéticos. El modelo en autoconsumo (on-grid) donde el sistema energético FV se integra a la red eléctrica pública, y el segundo está aislado de la red (off-grid) donde el sistema energético FV alimenta exclusivamente al sistema de riego. Luego, utilizando la herramienta computacional desarrollada se presenta el análisis de dos unidades demostrativas de riego por goteo FV (UDE) para uva de mesa en la zona norte y dos UDE en la zona sur para cultivos de frutilla para lo que se establecen medidas de eficiencia energética previos al diseño de los sistemas fotovoltaicos aplicados a riego por goteo. En ambas zonas se utiliza un modelo conectado a la red (on-grid) y un modelo aislado de la red (off-grid). De acuerdo con los resultados obtenidos se tiene que el sistema on-grid de la zona norte cubre el 100% de la demanda energética anual para el riego con una potencia instalada 4,5 veces menor que el sistema off-grid. Para los sistemas de la zona sur, el caso sistema conectado a la red el predio cultivado es 8,3 veces mayor, la potencia fotovoltaica dimensionada es solo 1,5 veces mayor. De esta forma, el sistema on-grid minimiza la potencia a instalar para un mismo predio, lo que significa un mejor uso de suelo cultivable y una menor inversión.

## ABSTRACT

The solar energy water pumping it's based on photovoltaic technologies, that transform the solar energy into electric energy to feed an engine, either in direct or alternating current, coupled to a water pump. Technology selection and proper sizing of the system's components it's crucial for a efficient and stable performance in a solar energy irrigation systems.

This work involve the development of a computational platform on Engineering Equation Solver (EES) for the proper photovoltaic systems sizing for irrigation systems technical operation. Developed numerical model includes hydraulic, electrical and meteorological variables in the simulation process, with which determines the energetic factibility, as well as other variables that suggests a especific prefactibility, like savings, inyections and energy consumption from the grid. Delivered outcomes allow the user to make a choice about photovoltaic power to be installed, given two energetic models. First we have an on-grid FV system, with integration with public electrical networks, and later the off-grid FV system, which is the only one that feeds the irrigation system.

After that, with the developed computational tool, it's presented the analisis of two demostrative units of FV drip irrigations for table grape in the north zone, and two demostrative units in the south zone for strawberry, for which energy efficiency measures are stablished in the previus photovoltaic systems design applied to drip irrigation. On both zones it's used the on-grid and off-grid model.

In accordance with the outcomes, the north zone on-grid system covers the annual energy demand for the irrigation with a system 4.5 times smaller than the off-grid system. In the south zone, with a growing zone 8.3 times bigger than the north zone, the on-grid system is only 50% bigger. Thus, the on-grid system minimize the size of power for the same growing zone, meaning in a better use of arable lands and a lower investment

## GLOSARIO

$\Delta T$  : Diferencia de temperatura entre la celda y la parte posterior del módulo.

$A_p$  : Área de plantación.

BT: Baja tensión.

CA: Corriente alterna.

CC: Corriente continua.

$D_r$ : Cias de riego mensuales.

DB: Demanda bruta de agua para riego [mm/mes].

DN: Cemanda neta [mm/mes].

$E_{1FV}$ : Energía anual generada por un sistema fotovoltaico de 1 [kWp].

$E_A$ : Demanda de energía anual por el sistema de riego [kW].

$E_D$ : Energía diaria aplicada al riego [kWh].

$E_{fa}$ : Eficiencia de aplicación [-].

ERNC: Energias renovables no convencionales.

$ET_m$ : Evapotranspiración de Cultivo [mm/mes].

$ET_o$ : Evapotranspiracion potencial [mm/mes].

$G_b$ : radiación solar directa [ $W/m^2$ ].

$G_d$ : radiación solar difusa [ $W/m^2$ ].

$H_B$ : Altura de bombeo del sector [m].

$H_f$ : pérdidas de carga por fricción [m].

$H_g$ : altura geométrica [m].

$H_s$ : pérdidas de carga singulares [m].

$H_T$ : presión de trabajo de la subunidad.

K: coeficiente de extinción del acristalamiento.

$K_C$ : Coeficiente de cultivo [-].

$K_r$ : coeficiente de cobertura [-].

$K_{\tau\alpha}$ : modificador del ángulo de incidencia [-].

L: espesor del acristalamiento del panel [mm].

MPPT: segidor del punto de maxima potencia.

$n$ : índice de refracción de la cubierta del panel fotovoltaico [-].  
 $N_e$ : Numero de emisores totales.  
 $N_{\text{paneles}}$ : numero de paneles calculados.  
 $P_{1FV}$ : La potencia eléctrica promedio de un sistema de 1[kWp] en el mes de máxima demanda, entre las 10; 00 y 11; 00 (AM) en el lugar del proyecto en [kW].  
 $P_{DC}$ : potencia horaria de los paneles fotovoltaicos [kW].  
 $P_{DC0}$ : potencia instalada de la instalación fotovoltaica [Wp], 21  
 $P_e$ : potencia eléctrica de bombeo [kW], 16  
 $P_{FV}$ : potencia fotovoltaica calculada [kW], 18  
 $P_T$ : porcentaje de pérdidas del sistema fotovoltaico [-], 22  
 $q_e$ : caudal nominal del emisor [lt/hr], 12  
 $Q_i$ : caudal de bombeo requerido, 16; caudal de operación [m<sup>3</sup>/s], 15  
 $R_{\text{beam}}$ : relación de la radiación inclinada versus la radiación solar horizontal [-].  
 $R_L$ : requerimientos de lavado de sales [-].  
RPM: Revoluciones por minuto.  
 $S$ : radiación incidente en la celda fotovoltaica [W/m<sup>2</sup>].  
 $S_{\text{ref}}$ : radiación de referencia 1000 [W/m<sup>2</sup>].  
SEC: Superintendencia de electricidad y combustible.  
 $T_a$ : temperatura ambiente [°C].  
 $T_c$ : temperatura de la celda [°C].  
 $T_0$ : temperatura de referencia [°C].  
 $T_p$ : temperatura del panel [°C].  
 $T_R$ : tiempo de riego diario [hr].  
UDE: Unidad demostrativa o piloto.  
 $v_w$ : velocidad del viento [m/s].  
 $\beta$ : ángulo de inclinación del panel fotovoltaico [°].  
 $\eta$ : eficiencia del inversor [-].  
 $\eta_E$ : eficiencia eléctrica de la bomba.  
 $\eta_H$ : eficiencia hidráulica de la bomba.  
 $\theta$ : ángulo de incidencia solar [°].  
 $\rho$ : albedo (reflectancia) [-].



$\tau(\theta)$ : transmitancia del sistema fotovoltaico [-].

$\gamma$ : coeficiente de temperatura del panel solar para la máxima potencia [%/°C].

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
GLOSARIO .....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	ix
INTRODUCCIÓN .....	xii
OBJETIVOS PROPUESTOS .....	xiv
Objetivos Generales. ....	xiv
Objetivos Específicos.....	xiv
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE .....	1
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO Y FOTVOLTAICO.....	4
2.1. Conceptos previos. ....	4
2.2. Sistema de riego tecnificado. ....	6
2.1.2 Subsector de Riego. ....	7
2.1.3 Sector de Riego. ....	7
2.1.6 Eficiencia de aplicación. ....	7
Fuente: Bases del concurso público de fomento al riego en la región del libertador general Bernardo O' higgins [2]. ....	7
2.2 Sistema fotovoltaico conectado a la red.....	8
2.2 Sistema fotovoltaico aislado de la red. ....	9
CAPÍTULO 3: Metodología para el dimensionamiento óptimo de generador fotovoltaico y diseño de la herramienta. ....	10
3.1. Determinación de la demanda hídrica.....	11
3.1.1. Evapotranspiración potencial. ....	12
3.1.2. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo. ....	12
3.1.3. Precipitación efectiva. ....	13
3.1.4. Demanda neta. ....	14

3.1.5. Demanda bruta .....	14
3.1.6. Necesidades de riego diarias y tiempo de riego. ....	15
3.2.    Modelo implementado de demanda hídrica. ....	16
3.3.    Presión de trabajo del sistema. ....	18
3.4.    Determinación de la demanda energética del riego.....	20
3.5.    Modelo implementado para el cálculo demanda energética del riego.	22
3.6.1. Sistema On-grid.....	23
3.6.2. Sistema Off-grid. ....	24
3.7.    Modelo del sistema fotovoltaico. ....	25
3.8.    Balance energético.....	30
3.8.1. Sistema conectado de la red.....	30
3.9.    Modelo Programa. ....	33
Etapa 1 Demanda hídrica .....	34
Etapa 2 Presión de trabajo.....	34
Etapa 4 Dimensionamiento del sistema FV, balance energético, estimación de	
ahorros. ....	35
CAPÍTULO 4: PRUEBA DE LA HERRAMIENTA.....	36
4.1. Resultados del dimensionamiento Zona norte. ....	41
4.2. Resultados del dimensionamiento Zona sur. ....	47
CONCLUSIONES .....	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
ANEXOS .....	57
ANEXO 1: PROGRAMACIÓN DEL RIEGO.....	57
Frecuencia de riego .....	58
Lamina neta de agua.....	58
ANEXO 2. COEFICIENTES DE CORRECCIÓN. ....	59
Coeficiente de lavado de sales.....	61

ANEXO 3. DISEÑO HIDRÁULICO, PERDIDA DE CARGA. ....	62
Presión de trabajo sistema de riego. ....	62
Perdidas de carga en tuberías. ....	62
Factor de fricción. ....	63
Pérdida de carga localizadas.....	63
Coeficiente de Uniformidad y Criterio de la Sub Unidad. ....	64
Presión y caudal de trabajo en los laterales.....	67
ANEXO 4. ÁNGULOS SOLARES.....	75
Tiempo solar aparente y hora solar .....	75
Altitud solar $\alpha$ . ....	78
Zenit Solar $\Phi$ .....	78
Azimut solar z. ....	78
Ángulos de superficie.....	79

## INTRODUCCIÓN

En Chile, el sector agroalimentario (agrícola, pesquero y de elaboración de alimentos) es un pilar fundamental de la economía nacional que depende principalmente de la disponibilidad de agua. El sector agrícola es el principal usuario de este recurso, ya que deriva agua para el riego alrededor del 73% del total de las extracciones, la minería y los usos industriales comparten un 21% [1].

Estimaciones del Ministerio de Agricultura indican que, del millón de hectáreas productivas, casi 500 mil, el 50%, están cubiertas por mecanismos de riego tecnificado (aspersión, goteo, micro aspersión, entre otros) con una eficiencia de aplicación del agua que puede llegar al 90%. La otra mitad utiliza riego superficial, con una eficiencia menor a un 45%.

En un escenario actual de escasez hídrica existen dos desafíos fundamentales que deben ser considerados: el primero tiene relación con hacer más eficiente su uso dentro del proceso productivo y el segundo con encontrar fuentes sustentables de generación de agua. Tomando en cuenta solo el primero de estos desafíos, Chile podría lograr disminuir en un 50% el agua utilizada en el proceso de riego, enfocando los esfuerzos en acelerar la implementación de sistemas de riego tecnificados de alta eficiencia [2].

Sin embargo, debido los planes de modernización e incorporación de nuevas tecnologías, los sistemas de riego han aumentado considerablemente el consumo de energía [3], por el mayor uso de bombas para extraer agua de las fuentes y regar los cultivos buscando la optimización en el uso de agua que es cada vez más escasa. En ese sentido, el sector agrícola ha estado buscando soluciones para disminuir los costos energéticos, especialmente a través de la eficiencia energética, pero últimamente se han aventurado algunas soluciones más novedosas e innovadoras, como sistemas de ERNC aplicadas al riego tecnificado y al autoconsumo energético por medio de energía solar fotovoltaica.

La tecnología fotovoltaica (FV) puede convertir la energía solar en electricidad, por esto el uso de paneles fotovoltaicos se ha convertido en una solución atractiva para

proporcionar la potencia necesaria para el sistema de bombeo de agua, especialmente en las zonas con abundantes recursos de energía solar [4], como es el caso de Chile. La alta confiabilidad técnica de estos sistemas para fines de riego, considerando que en muchas ocasiones se no se dispone de acceso a la red eléctrica, hace que esta tecnología tenga una importante valoración consiguiendo además que la energía sea consumida en la misma ubicación en la que es generada (autoconsumo).

Sin embargo, el elevado costo de inversión de las instalaciones solares fotovoltaicas hace necesario que su dimensionamiento se realice de forma precisa antes de llevar a cabo cualquier estudio posterior [5]. Un análisis simple utilizando alguno de los softwares disponibles en el mercado puede no ser adecuado pues se requiere asegurar la calidad del riego, dado que de esto depende la productividad del cultivo.

Son diversos los factores que influyen a la hora de dimensionar una instalación: los consumos, el tipo de instalación, la ubicación, si se trata de una industria o una residencia, etc. Para que la instalación sea rentable y eficiente es necesario conocer todos estos datos para realizar un dimensionado adaptado a las necesidades. Un riego con un presión de trabajo y caudal óptimos reducen los costos de implementación del sistema fotovoltaico hasta en un 40% [6], si dimensionamos de manera eficiente la energía aplicada al riego, la energía solar fotovoltaica podrá ser más accesible.

En este trabajo se propone una metodología y herramienta computacional, implementada en el software Engineering Equation Solver (EES), para el diseño de una instalación fotovoltaica destinada a alimentar un sistema de bombeo de agua para el riego según las condiciones propias del cultivo, con parámetros óptimos de caudal y presión de trabajo. En lo sucesivo, el texto, se referirá a la plataforma computacional indistintamente como software o herramienta.

# OBJETIVOS PROPUESTOS

## Objetivos Generales.

El sector agroindustrial está buscando soluciones para disminuir los costos energéticos, especialmente a través de la eficiencia energética, pero últimamente se han aventurado algunas soluciones más novedosas e innovadoras, como sistemas de ERNC aplicadas al riego tecnificado y al autoconsumo energético por medio de energía solar fotovoltaica.

En esta memoria se plantea el desarrollo de una herramienta computacional para lograr el dimensionamiento adecuado el dimensionamiento adecuado de los componentes Sistema fotovoltaico aplicado a un sistema de riego, bajo las condiciones agroecológicas y productivas de la una zona a evaluar.

## Objetivos Específicos

- Actualizar el estado del arte basado en el diseño y cálculo de sistemas fotovoltaicos aplicados a sistemas de bombeo.
- Desarrollar una metodología para proyectar la elevación y caudal de agua según parámetros agronómicos (tipo de fruta, sistema de riego, etc.), geográficos y climáticos.
- Contar con una metodología fundamentada tanto teórica como empíricamente para el dimensionamiento de un sistema de energía solar fotovoltaica usado para alimentar el sistema de bombeo de agua para riego.
- Elaborar una herramienta para la simulación el sistema fotovoltaico con datos reales (datos horarios) de radiación solar para determinar el consumo energético anual y comparar las diferentes soluciones.

## CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

El modelado de un sistema fotovoltaico aplicado a riego y su optimización vía herramientas computacionales analizando todos los elementos relevantes del sistema y sus características sistema fotovoltaico, clima local, cultivos y método de riego fue presentado por primera vez por Cuadros et al. (2005) [5], muestra un programa informático que dimensiona un equipo fotovoltaico, que se usará para el riego de una explotación agrícola. Con el fin de regar el máximo número de plantas (en este caso la aplicación se ha hecho a olivos), utilizando el mínimo número de paneles solares posibles. Se trata de un programa que dimensiona tanto la instalación de riego, como la de bombeo fotovoltaico, de forma que no es necesario ser un especialista en riego para su manejo, por lo que, a opinión de los autores, es muy válido tanto para instaladores, como para proyectistas y agricultores. Aunque se emplea fundamentalmente para el cálculo de instalaciones de riego por goteo de un cultivo de olivo, debido a que los valores de los coeficientes de cultivo  $K_c$ , también es posible aplicarlo a cultivos de viñedos, almendros u otro tipo de especies arbóreas, eso sí, es necesario localizar los coeficientes apropiados.

Glasnovic y Margeta (2007) [7] plantean una manera de dimensionar un sistema de bombeo *FV* tomando en cuenta los elementos relevantes de un sistema de bombeo *FV*, tales como: los pozos, clima local, el tipo de suelo, el tipo de plantación, y el sistema de riego. En sus resultados muestran que el enfoque clásico para dimensionar el sistema de riego por bombeo *FV*, el cual considera por separado las demandas de energía hidráulica, y la posibilidad de su producción por el sistema de bombeo *FV*, de acuerdo a la energía solar disponible, definiendo esto como un proceso no sistemático y estático, y por lo tanto, no es óptimo. El resultado de este enfoque es un modelo matemático, que permite dimensionar de manera óptima la potencia eléctrica nominal del sistema *FV*.

Campana et al. (2013) [8] desarrollan una herramienta de simulación dinámica para un sistema fotovoltaico de bombeo de agua, integrando todas las variaciones dinámicas de la demanda de agua, la irradiación solar, la potencia de potencia



fotovoltaica y las prestaciones de la bomba. Tanto la bomba AC como la DC y los sistemas de seguimiento solar y de dos ejes se investigaron desde un punto de vista técnico y económico. Se desarrolló un modelo dinámico de demanda de agua basado en las condiciones climáticas locales, características del suelo y tipo de cultivos. Con la predicción de la demanda de agua se estudiaron las prestaciones instantáneas del sistema PVWP. Tal simulación puede ser usada para evaluar el diseño existente, verificando si hay desajuste entre el agua bombeada y el agua demandada. Los resultados también darían algunas pautas o sugerencias sobre la optimización del sistema desde la perspectiva de la demanda dinámica de agua.

El trabajo desarrollado por Campana et al. (2013) consta de 4 modelos, partiendo por el de demanda de agua de un cultivo  $W_g$  en  $m^3/día$ , basado en la evapotranspiración de calculada con la ecuación de Penman-Monteith, para lo que se requiere conocer:

- Radiación solar
- Temperatura ambiente
- Humedad
- Velocidad del viento
- Precipitación acumulada

Luego presenta el modelo de radiación solar y sistema fotovoltaico que consideró la estimación de la potencia horaria del arreglo  $P_{in}(T, \theta)$ , dependiendo de la radiación directa horaria y la radiación difusa, del ángulo de incidencia  $\theta$  y de la temperatura  $T$ . Y finalmente presenta un modelo de moto-bomba marca lorentz (bomba solar) para lo que desarrolla un polinomio para el caudal  $Q(P_{in}, H_m)$  de la bomba analizada (con motor AC y DC) en función de una altura hidráulica constante  $H_m$  y la potencia entregada por los paneles solares  $P_{in}$ .

Un diagrama esquemático del sistema fotovoltaico de bombeo de agua estudiado en este trabajo se presenta en la Figura 1.

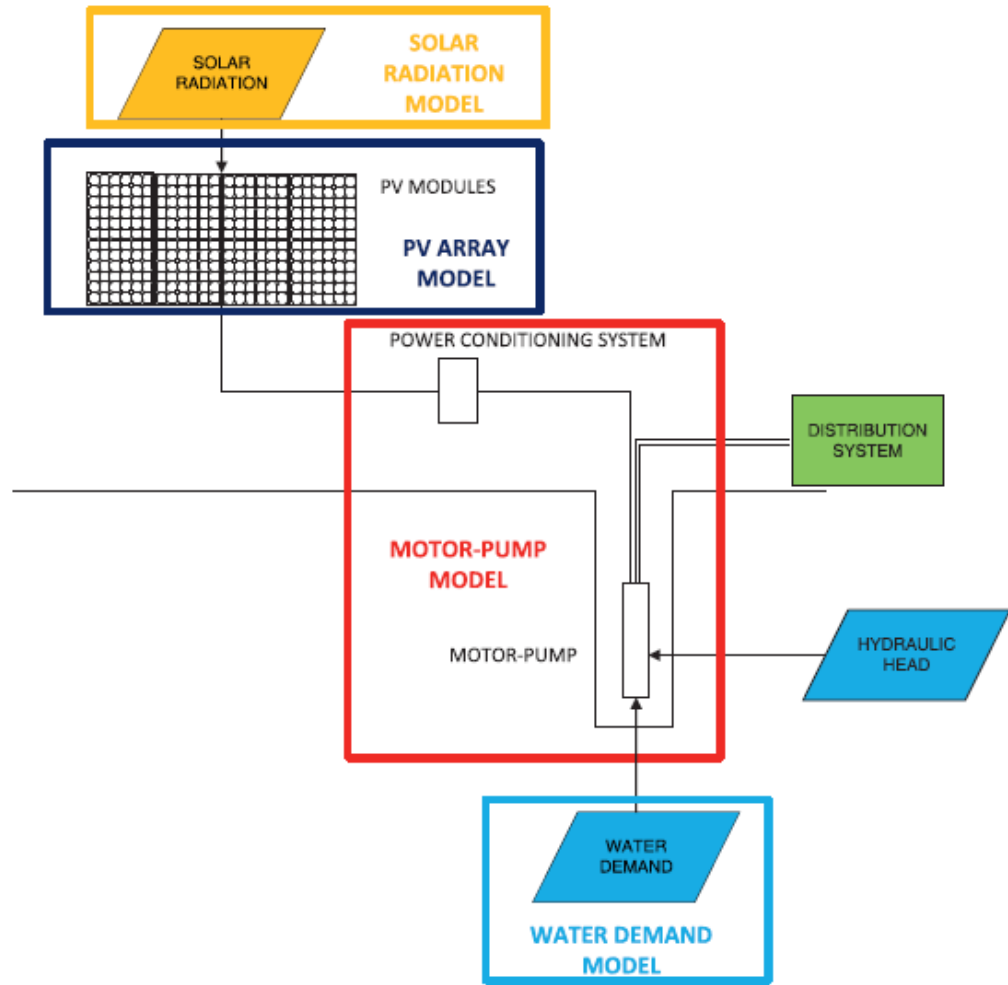


Figura 1. Diagrama esquemático del modelo fotovoltaico de bombeo de agua propuesto.

## **CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO Y FOTOVOLTAICO.**

### **2.1. Conceptos previos.**

El diseño agronómico representa la primera fase del procedimiento de diseño de cualquier tipo de riego, en el que se determina la cantidad de agua que ha de transportar la instalación, en base a el tipo, número y caudal de los emisores por cada planta. Los emisores son los elementos que permiten la salida del agua hacia la planta con un caudal controlado. Estos son definidos por una serie de factores que se deben evaluar para lograr un buen resultado final en lo que se refiere a aprovechamiento del agua aplicada. Los factores más importantes que definen los tipos de emisores a utilizar son los siguientes:

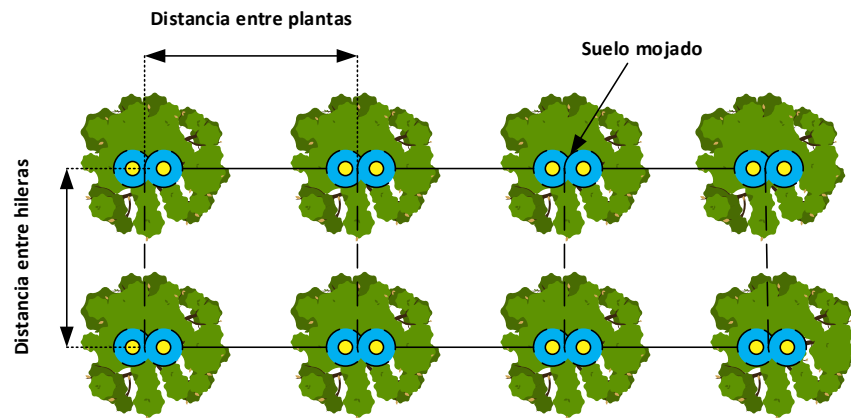
- a. Hábito de crecimiento del sistema radicular (profundo o superficial).
- b. Tipo de suelo (texturas finas, medias o gruesas).
- c. Diseño de plantación (marco de plantación tradicional, alta densidad o cultivo hilerado).

El número de los emisores a utilizar en el sistema de riego y su caudal, determina el caudal de diseño y el porcentaje de superficie mojada en el suelo, que corresponde a la fracción entre el área mojada por los emisores de una planta y el marco de plantación. Este porcentaje está determinado por los requerimientos hídricos diarios del cultivo determinados según la frecuencia de riego para el mes de máxima demanda (ver anexo 1). Para lograr mojamientos adecuados, es aconsejable realizar una prueba de campo y así definir el número de emisores requeridos por planta. Para esto, se debe tener una idea del tipo de emisor y su caudal aproximado que se va a utilizar. Después de realizar varios ciclos de humedecimiento con los emisores de prueba se excava el terreno y se determina el área y la profundidad que está mojando ese emisor.

Con el caudal de diseño, se determina posteriormente el tiempo de riego en el mes de máxima demanda, con el cual se definen los sectores de riego en base al tiempo

disponible (propuesto por el diseñador o definido por el agricultor) que depende principalmente de la disponibilidad de agua. En el caso del modelo aislado de la red considera un tiempo de riego de 5 horas, correspondientes a las horas de máxima radiación solar. En etapa se define la separación entre los emisores y las tuberías laterales de acuerdo al marco de plantación y un criterio de diseño para la parte hidráulica que se conoce como coeficiente de uniformidad.

El marco de plantación,  $MP$ , corresponde al área asignada a cada planta en metros cuadrados, como se muestra en la Figura 2, y define el espaciamiento de las plantas y entre hileras. La disposición de estos puede adoptar varias formas según el diseño agronómico: cuadrado, rectangular, tresbolillo (triangular), entre otros.



**Figura 2. Marco de plantación rectangular de un cultivo frutal.**

De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 1 se muestran los datos iniciales con los que se definen los aspectos fundamentales de un proyecto agrícola que se quiere evaluar.

**Tabla 1. Parámetros provenientes del diseño agronómico de un cultivo.**

Marco de plantación	$MP$
Número de plantas	$N_{plantas}$
Numero de emisores por planta	$n_e$
Caudal de los emisores	$q_e$
Coefficiente de uniformidad	$CU$

## 2.2. Sistema de riego tecnificado.

En una instalación típica de riego, el agua es conducida a cada planta a través de una red de tuberías y entregada por distintos emisores (aspersores, goteros, microaspersores cintas, etc.). El sistema está constituido por un cabezal de riego (Medición de caudal, aparatos de control hidráulico, filtros, etc.) y una red de distribución que incluye las tuberías primarias o matrices, secundarias, terciarias y laterales donde van insertos los emisores. En el terreno, el agua se distribuye formando un bulbo húmedo cuya forma y tamaño depende del tipo de suelo, caudal del emisor y tiempo de riego. En la Figura 3, se presenta un esquema de un sistema de riego localizado con todos los elementos en común.

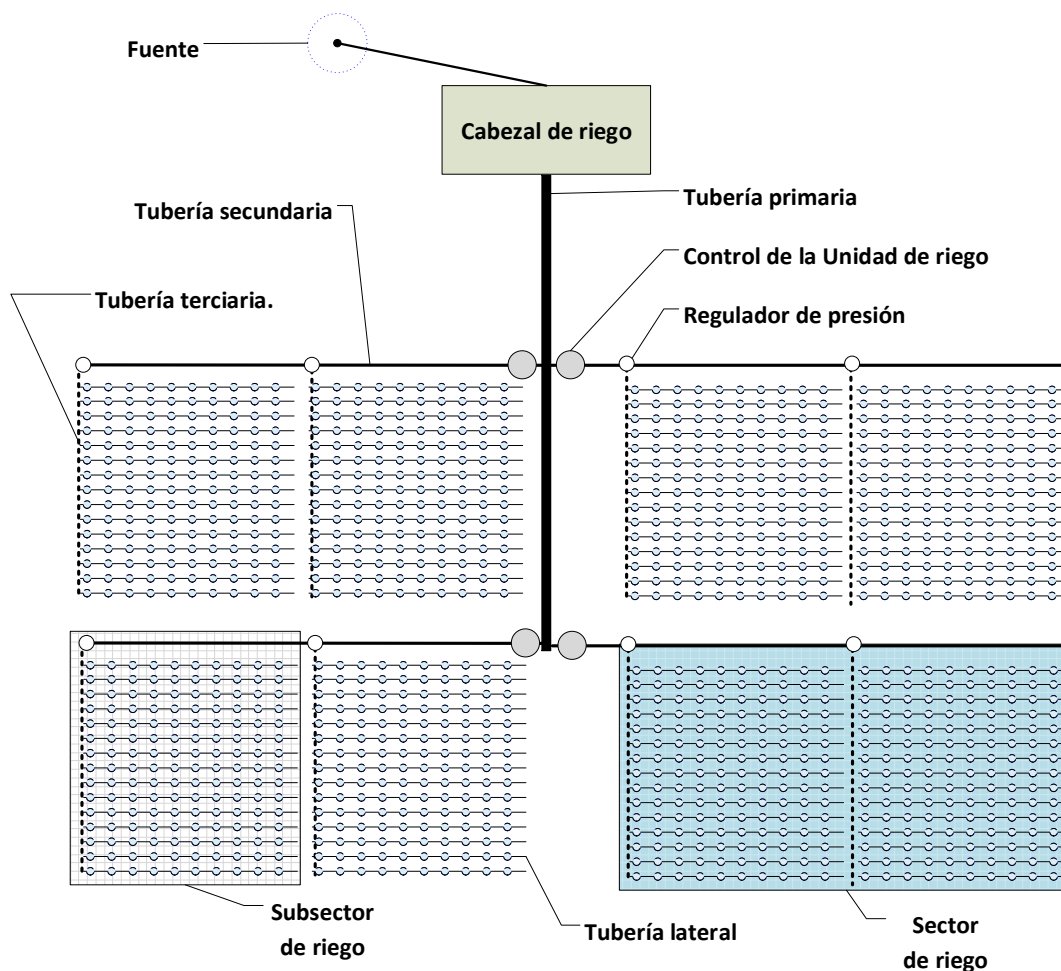


Figura 3. Elementos principales de un sistema de riego tecnificado.

### **2.1.2 Subsector de Riego.**

Se suele denominar subsector o subunidad de riego, a la superficie dominada por un regulador de presión, constituida por una tubería terciaria, un conjunto de laterales, normalmente de polietileno de baja densidad (PEBD) que portan los respectivos emisores. Para cada subunidad se determinan un las necesidades hídricas y presión de trabajo, pues pueden tener distintos cultivos entre ellas y/o superficies.

### **2.1.3 Sector de Riego.**

Corresponde a un conjunto de subunidades que funcionan juntas, o con las mismas características. Se suelen agrupar las subunidades que funcionan dentro de un mismo turno de riego. Luego el caudal de bombeo corresponde a la suma de los caudales de las subunidades regadas y la presión de trabajo corresponde a la de la subunidad de mayor presión. Para mantener la subunidad operando en condiciones de diseño, las diferencias de presión y caudal entre cada subunidad se regulan con mecanismos de control como válvulas reguladoras de presión y de caudal.

### **2.1.6 Eficiencia de aplicación.**

El ahorro de agua prioriza la utilización de métodos de riego presurizados con alta eficiencia de aplicación, que corresponde a la relación entre el agua aplicada por el sistema de riego y la que queda almacenada en la zona de raíces (zona radicular) y es aprovechada por el cultivo. El método de riego presurizado más utilizado en el territorio nacional es por goteo perteneciente a los sistemas de riego localizado [9]. Estos sistemas tienen un 90% de eficiencia (ver tabla 2), dado que permiten suministrar agua y fertilizantes en forma dirigida a la planta.

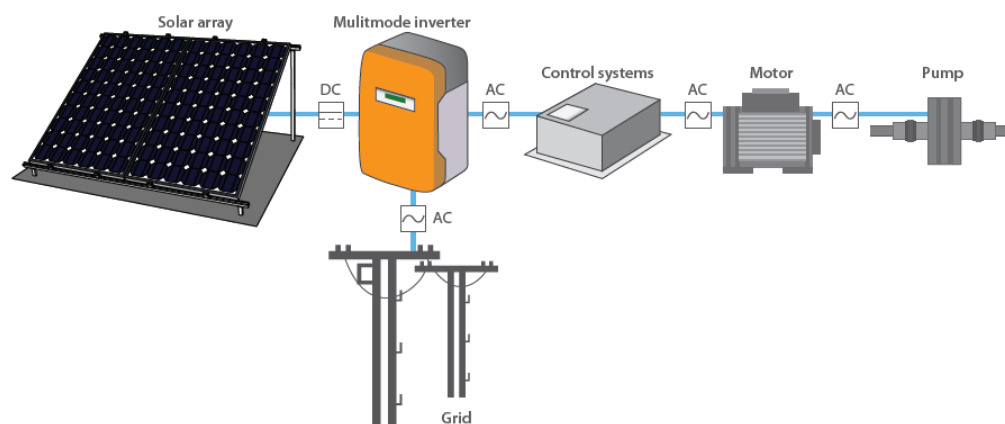
**Tabla 2. Eficiencia de aplicación de agua según método de riego.**

<b>Método de riego</b>	<b>Eficiencia de aplicación (%)</b>
Aspersión	75
Microjet y microaspersión	85
Goteo	90

**Fuente: Bases del concurso público de fomento al riego en la región del libertador general Bernardo O' higgins [2].**

## 2.2 Sistema fotovoltaico conectado a la red.

En el riego solar conectado a red, el sistema FV, esta interconectado con la red de energía eléctrica de la casa que a su vez está conectada a la red pública. Se utiliza para proporcionar la energía demandada por la bomba de riego convencional y adicionalmente, las otras cargas de la casa. En función de los patrones de carga y la variación de recursos solar durante el día, el sistema FV podrá autoabastecer el consumo eléctrico de riego y la casa, con apoyo de la red y/o inyectar la energía excedente a la red de la compañía eléctrica local. Este modo de operación requiere un inversor para convertir la corriente continua generada por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna de la red eléctrica. Los principales componentes del riego solar conectados a la red se describen en la Figura 4.

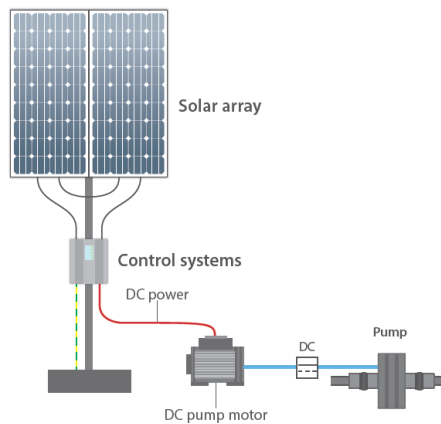


**Figura 4. Componentes del riego solar conectados a la red. Fuente: Manual de eficiencia energética en el sector de la fruta fresca en Chile [10].**

En este tipo de configuración el sistema de riego y el resto de los consumos (incluye el doméstico) están conectados a la red eléctrica local. Los elementos que componen el sistema de riego fotovoltaico On-Grid son: paneles fotovoltaicos, estructura soportante, inversor, medidor de consumo eléctrico bidireccional. Estos deben cumplir con la normativa de la SEC. Al emplear este sistema, los criterios de elección de los inversores y módulos fotovoltaicos, como la forma de conectarlos se deben ceñir a la normativa y reglamentación de la Ley 20.571 de generación distribuida (Net-metering o Net-billing).

## 2.2 Sistema fotovoltaico aislado de la red.

En el riego solar autónomo, el sistema FV está aislado de la red de distribución eléctrica, y se utiliza únicamente para satisfacer las necesidades energéticas de una bomba solar de riego. El sistema, transforma la energía solar en electricidad para alimentar directamente la bomba de riego solar, sin acumulación en baterías, durante las 5 horas centrales de día solar. Un controlador solar mantiene trabajando en su punto de máxima eficiencia al motor eléctrico que integra la bomba de riego, variando su frecuencia eléctrica y en consecuencia las RPM y caudal de entrega de la bomba. Este motor eléctrico trifásico funciona con corriente continua y posee un rotor con imanes permanentes de neodimio. Los elementos del sistema off-grid desarrollado en este trabajo se muestran en la Figura 5.



**Figura 5. Componentes del riego solar autónomo directo. Fuente: Manual de eficiencia energética en el sector de la fruta fresca en Chile [10].**

Los actuales sistemas fotovoltaicos aislados aplicados a riego están formados por módulos que alimentan directamente a bombas solares de alta eficiencia que funcionan con corriente continua, por lo que pueden utilizar de manera directa la energía eléctrica generada por el panel fotovoltaico, no necesitando de inversor. Los elementos que componen el sistema fotovoltaico son: paneles fotovoltaicos, estructura soportante, controlador de bomba y bomba solar. Estas bombas cuentan con un amplio rango de potencias, sin embargo, reciben la energía eléctrica generada en forma variable en relación a la posición del sol [10].



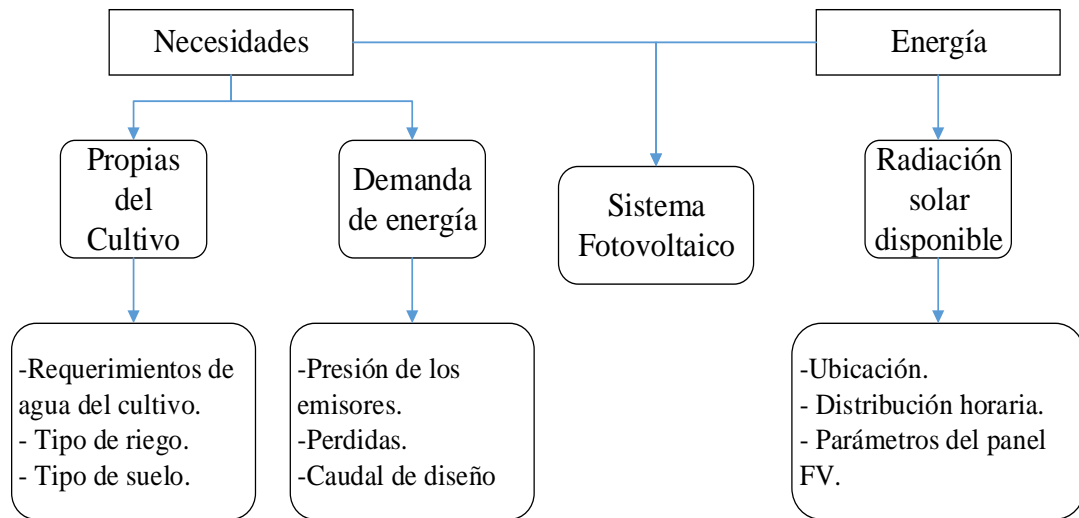
### **CAPÍTULO 3: Metodología para el dimensionamiento óptimo de generador fotovoltaico y diseño de la herramienta.**

En este capítulo se elabora una metodología para dimensionar un sistema fotovoltaico integrado a la unidad de riego, que genere la cantidad de energía igual a las necesidades eléctricas del sistema de riego bajo los modelos energéticos aislado y conectado a la red eléctrica local. Para ello, en primer lugar, se evaluarán las necesidades hídricas de los cultivos en las zonas geográficas de interés, luego se establecerán las necesidades energéticas del riego y posteriormente se determinará la potencia óptima del generador fotovoltaico, inmediatamente la explicación de la metodología se presenta el modelo implementado en la herramienta computacional.

El procedimiento de diseño para sistemas de bombeo solar, se basa en determinar aspectos de aspectos propios de los cultivos, estimar la demanda hídrica y así establecer las necesidades de demanda energética, versus la energía que es posible de captar mediante los paneles fotovoltaicos, teniendo en cuentas las condicionantes que afectan la captación de la energía solar.

En la determinación de los requerimientos de agua, se tiene en consideración aspectos fundamentales para el correcto crecimiento del cultivo, para no afectar el desarrollo de éste. Además, de un aspecto muy importante, ya que el tamaño y costo del sistema fotovoltaico dependerá de la cantidad de agua requerida, es por ello que se tiene que tener sumo cuidado en el cálculo necesario para el cultivo, para no sobredimensionar y no estar elevando aún más los costos que significa emplazar este tipo de tecnología.

A continuación, se presenta un esquema básico de cálculo para el diseño de instalaciones solares fotovoltaicas para riego sin acumulación.



**Diagrama 1. Esquema propuesto para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico aplicado a riego.**

La metodología implementada en el programa consta de cuatro etapas:

- Determinación de las necesidades hídricas del predio en cuestión, para lo que se utilizarán las variables suministradas la base de datos climática de agromet.
- Estimación de la presión del sistema de bombeo, en función de la altura (nivel de abatimiento) de la fuente de agua y de la altura necesaria para estabilizar la presión en los emisores de la red de distribución (altura del sistema).
- Determinación de la potencia máxima requerida para el riego de una parcela de una extensión determinada, cuya superficie debe proporcionarse al programa, teniendo en cuenta el rendimiento del sistema de riego-bombeo-generación fotovoltaica.
- Determinar el consumo energético anual, estimar ahorros y comparar las diferentes soluciones posibles.

### **3.1. Determinación de la demanda hídrica.**

Las demandas de agua de riego de un territorio dependen de las necesidades hídricas de cada cultivo durante su período vegetativo, de la cantidad de aguas lluvias que puedan suplir en parte esas necesidades, de los sistemas de riego que utilicen los

agricultores, y de la eficiencia de aplicación del agua que logran los productores. La demanda hídrica se calcula a partir de los valores de evapotranspiración estimados para los cultivos.

### **3.1.1. Evapotranspiración potencial.**

La evapotranspiración potencial,  $ET_0$ , es la suma del agua evaporada del suelo más el agua transpirada por una superficie de pasto bajo condiciones ideales considerándose universalmente como un buen estimador de las necesidades hídricas de un cultivo. Uno de los métodos más utilizados para determinar en forma simple las necesidades de agua es el método descrito por Doorenbos y Pruitt [11]. Otro método, denominado de Penman-Monteith [12] se recomienda como el único adecuado para determinar la evapotranspiración de referencia o potencial,  $ET_0$ . Las estaciones agrometeorológicas pueden medir todos los componentes necesarios para determinar la evapotranspiración. La velocidad del viento, la radiación, la temperatura del aire y la humedad atmosférica son los principales parámetros climáticos que determinan la evapotranspiración potencial.

### **3.1.2. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo.**

La evapotranspiración en las condiciones propias de cada cultivo,  $ET_m$ , llamada evapotranspiración máxima o de cultivo se estima a partir del valor de referencia,  $ET_0$  en función del cultivo en crecimiento, las condiciones climáticas, los parámetros característicos del suelo y la fase vegetativa. Estas consideraciones se resumen en un concepto propio de cada cultivo (tipo de planta) llamado coeficiente de cultivo,  $K_c$ . Este factor se ha calculado para cada especie y fase de crecimiento.

El coeficiente de cultivo se encuentra tabulado en boletines informativos de la CNR [13], [14] y en el informe final del sistema nacional de referencia sobre demandas de agua por la agricultura, para distintos tipos de cultivos para distintos tipos de cultivos durante todos meses del año como se muestra en la Figura 6.

Valores de Kc mensuales

	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Cítricos	0,85	0,85	0,85	0,85	0,80	0,80	0,75	0,75	0,80	0,80	0,80	0,85
Palto	0,85	0,85	0,85	0,85	0,80	0,80	0,75	0,75	0,80	0,80	0,80	0,85
Olivo	0,50	0,50	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,60	0,65	0,50
Manzano	---	---	---	0,40	0,60	0,85	1,00	1,00	0,95	0,70	---	---
Peral	---	---	---	0,40	0,55	0,75	0,90	0,90	0,70	0,65	---	---
Durazno	---	---	---	0,40	0,55	0,75	0,90	0,90	0,70	0,65	---	---
Damasco	---	---	---	0,40	0,55	0,75	0,90	0,90	0,70	0,65	---	---
Cerezo	---	---	---	0,40	0,60	0,85	1,00	1,00	0,95	0,70	---	---
Ciruelo	---	---	---	0,40	0,55	0,75	0,90	0,90	0,70	0,65	---	---
Uva de mesa	---	---	---	0,45	0,60	0,70	0,85	0,85	0,70	0,60	0,50	---
Vid vinífera	---	---	---	---	0,15	0,35	0,50	0,30	0,20	---	---	---

Figura 6. Coeficiente de cultivo para distintos tipos de plantaciones [13].

A partir de la  $ET_0$  obtenida para el área en estudio, se determina la evapotranspiración de cultivo ( $ET_m$ ) para, a través de la siguiente ecuación:

$$ET_m = K_C \cdot ET_0 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right] \quad (1)$$

Donde,

$ET_0$  = evapotranspiración potencial [mm/mes].

$K_C$  = coeficiente de cultivo [-].

### 3.1.3. Precipitación efectiva.

La determinación rigurosa de este parámetro encierra especiales dificultades, por lo que es necesario recurrir a métodos simplificados, donde se puede estimar a partir de la precipitación acumulada mensual. La precipitación efectiva mensual (mm), se calcula de acuerdo con el método del Bureau of Reclamation de Estados Unidos donde  $P_e$  es una función de las precipitaciones totales del mes,  $pt$ .

$$P_e = \begin{cases} \frac{pt}{125} \cdot (125 - 0,2 \cdot pt), & pt < 250 \text{ [mm] en el mes} \\ 125 + 0,1 \cdot pt, & pt \geq 250 \text{ [mm] en el mes} \end{cases} \quad (2)$$

### 3.1.4. Demanda neta.

A partir de la  $ET_m$  y la precipitación efectiva,  $P_e$ , se calcula la demanda neta mensual de agua de riego, DN, para cada cultivo seleccionado que es la necesidad de agua que se debe suministrar a la zona radicular del cultivo mediante el riego.

$$DN = ET_C - P_e \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right] \quad (3)$$

### 3.1.5. Demanda bruta

A partir de la demanda neta, se obtiene la demanda bruta por cultivo que corresponde a la cantidad de agua que el sistema de riego debe proporcionar a nivel superficial, luego de descontarse las pérdidas de agua debido a las ineficiencias del sistema de riego y la aplicación de coeficientes de corrección. Para ello se estima la eficiencia de aplicación del agua de acuerdo con los métodos de riego posibles de utilizar en la zona de estudio. Para el caso del riego por goteo utilizado en este trabajo, la eficiencia de aplicación del agua utilizada es del 90%. La eficiencia de aplicación ( $E_{fa}$ ) contempla las pérdidas de agua por percolación profunda y escurrimiento superficial.

Para el cálculo de la demanda bruta, a partir de la demanda neta (DN), es necesario tomar en cuenta también los requerimientos de lavado ( $R_L$ ) y un coeficiente de cobertura ( $K_r$ ). Los requerimientos de lavado corresponden a la cantidad de agua mínima de percolación para mantener la salinidad del suelo a un nivel no perjudicial para el desarrollo de las plantas. La idea central de la utilización del coeficiente de cobertura es que no debe mojarse todo el marco de plantación para asegurar el riego de una especie frutal. Por esta razón se disminuye la tasa de riego aplicando un factor que siempre será menor o igual a 1. La demanda bruta queda definida de la siguiente manera:

$$DB = \frac{DN \cdot (1 + R_L) \cdot K_r}{E_{fa}} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right] \quad (4)$$

Donde,

$DN$  = demanda neta [mm/mes].

$R_L$  = requerimientos de lavado [-].

$K_r$  = coeficiente de cobertura [-].

$E_{fa}$  = eficiencia de aplicación.

### 3.1.6. Necesidades de riego diarias y tiempo de riego.

Las necesidades hídricas mensuales de un cultivo se obtienen en mm/mes, pero también se puede expresar en litros/día. Si dividimos estas necesidades entre el número de días para el mes en los cuales es necesario el riego se obtienen las necesidades diarias de riego. Luego el volumen de agua entregado en cada riego por los emisores  $N_e$  que tienen un caudal nominal de  $q_e$  [lt/h] en un tiempo de riego diario  $T_R$  debe ser igual a la demanda hídrica diaria de riego. Es recomendable probar distintas combinaciones de emisores y con diferentes caudales, que cumplan con las condiciones mencionadas en los conceptos previos, para comprobar que se cumple con los tiempos de riego disponibles. El tiempo de riego adecuado de horas para el funcionamiento continuo de un sistema de riego, para aplicar y suplir las necesidades hídricas de la planta se muestra en la ecuación 5.

$$T_R = \frac{DB \cdot A_p}{N_e \cdot q_e \cdot D_r} \text{ [hr]} \quad (5)$$

Donde,

$T_R$  = Tiempo de riego por día de aplicación [hr]

$DB$  = Demanda bruta mensual [mm]

$N_e$  = Numero de emisores totales [-]

$q_e$  = Caudal nominal del emisor [l/hr]

$D_r$  = Días de riego en mensuales.

$A_p$  = Área de plantación [Ha].

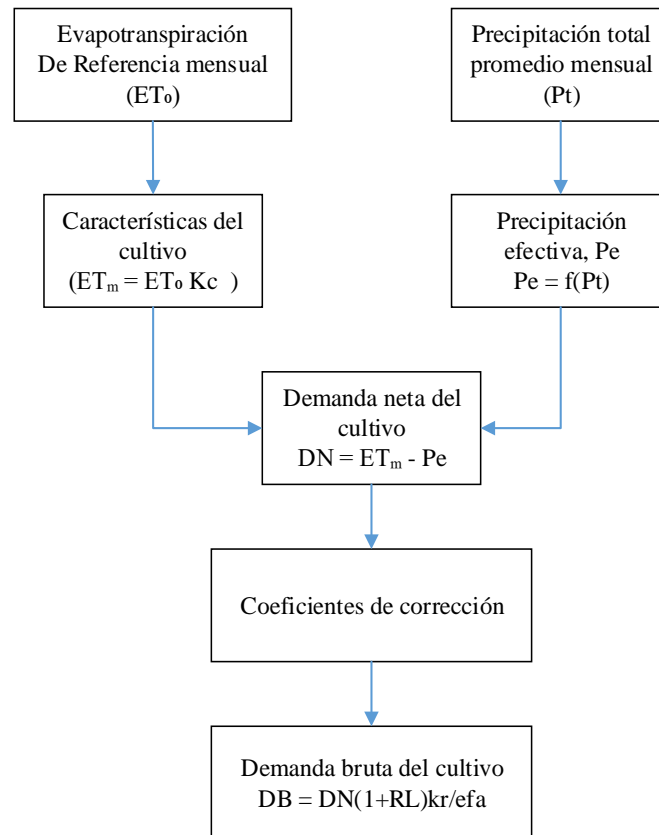
En un principio, se desconoce tanto el tiempo como los días de riego de un mes, en la práctica se fija una de las variables mencionadas mediante una adecuada programación del riego, que es una metodología que consiste en establecer la frecuencia y tiempo de riego de acuerdo a las condiciones del predio. La frecuencia intervalo entre los riegos y la cantidad de agua que se aplicará en cada riego dependerá de la cantidad de agua que se mantenga en la zona de raíces y de la rapidez con la que la utiliza el cultivo. Esto está determinado por la textura de la tierra, estructura del suelo (penetración de agua), profundidad de la zona radicular efectiva del suelo, el cultivo, la etapa de desarrollo del cultivo [15]. Para riegos de alta frecuencia se fija un intervalo que puede ser de uno, dos o más días, de esta forma se trata de mantener una humedad constante del suelo, cercana a la Capacidad de Campo [16]. El calendario anual de riego determinado o entregado por un experto en riego indica la frecuencia de riegos y días de riego para cada mes. En el anexo 1 se discute una metodología para la determinación del programa de riegos.

En este trabajo se estableció un tiempo de riego de 8 horas para los sistemas conectados a la red y de 5 horas para los aislados, por lo tanto, varían los días de riego. Este tiempo viene de la determinación de los días de acuerdo con la frecuencia de riego según las condiciones locales (ver anexo 1). En algunos casos se fija la frecuencia de riego y se varía el tiempo, lo que es conocido como riego de alta frecuencia en donde se establecen riegos cada 1, 2 o más días para mantener el cultivo las condiciones de humedad óptimas.

### **3.2. Modelo implementado de demanda hídrica.**

El modelo adoptado para la estimación de la demanda de agua se basó en supuestos relativos a las características del cultivo y del suelo presentados en la metodología.

Como se puede apreciar en el Diagrama 2, para poder realizar los cálculos de requerimientos de riego del cultivo, es necesario disponer de datos relacionados al clima de la zona y a las características del riego utilizado.



**Diagrama 2 Pasos para la determinación de la demanda hídrica mensual.**

Las estaciones agrometeorológicas pueden medir todos los componentes necesarios para determinar la evapotranspiración. La velocidad del viento, la radiación, la temperatura del aire y la humedad atmosférica son los principales parámetros climáticos que determinan la evapotranspiración potencial. En este trabajo la evapotranspiración potencial mensual,  $ET_0$  [mm/mes], se obtiene de la cartografía disponible en la página web del sistema de Información Integral de Riego (SIIR) [17].

El coeficiente de cultivo,  $K_C$ , describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde el inicio de la temporada. En la siguiente tabla se presenta el valor mensual de este coeficiente para dos tipos de cultivos.



**Tabla 3. Coeficiente de cultivo mensual para uva de mesa y frutilla.**

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Uva	0,7	0,6	0,5	-	-	-	-	0,45	0,6	0,7	0,85	0,85
Frutilla	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,63	0,85	0,85	0,8	0,75

Fuente: [13], [18].

Para el cálculo de la precipitación efectiva se utiliza la precipitación total mensual, esta se encuentra disponible en la red agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). En general se tienen datos desde el año 2011 al 2016. Para generar la base de datos, se realiza un promedio para la precipitación acumulada de cada mes.  $pt$  [mm/mes].

Los Coeficientes de corrección mencionados corresponden a los requerimientos de lavado ( $R_L$ ) y el coeficiente de cobertura ( $K_r$ ) que se detallan en el anexo 2. Se incluye además la eficiencia de aplicación que corresponde a la relación entre el agua aplicada por el sistema de riego y la que queda almacenada en la zona de raíces (zona radicular) y es aprovechada por el cultivo (ver Tabla 2).

Definidos los tiempos, días de riego mensuales y los caudales de diseño se puede determinar posteriormente la demanda energética, para esto se debe conocer también la presión de trabajo del sistema. Un adecuado calendario de riegos es importante para posteriormente realizar una adecuada gestión hídrica, que es fundamental para mejorar la calidad y cantidad de los productos de los cultivos.

### **3.3.Presión de trabajo del sistema.**

Lo que se busca en este ítem es determinar una presión o altura adecuada de trabajo del sistema (altura de bombeo) utilizando medidas de eficiencia energética como, por ejemplo, reduciendo la presión de trabajo del riego, usando emisores de menor presión de trabajo, o disminuyendo las pérdidas de carga en redes hidráulicas, incrementando los diámetros de tubería, o usando filtros que trabajan con menores presiones. selección de motores y bombas con mayor rendimiento para el rango caudal/presión con el que se va a trabajar, evitando el sobredimensionamiento de los

equipos de bombeo, utilizando equipos que permiten lograr caudales y presiones acordes con la necesidad real del cultivo.

Un caso simple es cuando el sistema está compuesto por un solo subsector de riego. En otros casos, la presión de trabajo dependerá de los turnos de riego, es decir, de los subsectores que se riegan a la vez. Si se riega más de un sector, la presión y caudal de operación en cada caso pueden ser diferentes, por lo tanto, se debe determinar la presión de trabajo de los distintos subsectores y sectores de riego.

La altura dinámica total se calcula teniendo en cuenta varias contribuciones, como la presión mínima de salida requerida por el sistema de riego, la altura del tubo de salida sobre la superficie del suelo, la profundidad del nivel de agua estática, la profundidad del nivel dinámico del agua y las pérdidas por fricción debido al circuito de la tubería (ver anexo 3).

La altura manométrica de un sector de riego determinada a partir de de la ecuación de Bernoulli, está dada de la siguiente forma:

$$H_B = \pm H_g + H_f(Q_i) + H_s(Q_i) + H_T(Q_i) \quad (6)$$

Donde:

$Q_i$ : Caudal de operación [ $m^3/s$ ]

$H_B$ : Altura manométrica total [m]

$H_g$ : Altura geométrica [m]

$H_f$ : Pérdidas de carga por fricción [m]

$H_s$ : Pérdidas de carga singulares [m]

$H_T$ : Presión de trabajo de la subunidad (Presión necesaria en la subunidad) [m]

$H_g$  es la diferencia de altura del nivel de abatimiento de la fuente de agua y el arco o control de la unidad de riego. Está relacionada con la topografía del lugar.

La pérdida de carga por fricción o roce del agua con la pared de la tubería. Luego, se define la pérdida de carga de acuerdo a la ecuación de Darcy – Weisbach (ver anexo 3).

Las pérdidas de carga singulares son las disipaciones de energía producidas por agitaciones turbulentas de carácter local, es decir, donde se verifican grandes variaciones de las condiciones hidráulicas, como variaciones de presión, velocidad, etc. En una red de tuberías estas singularidades corresponden a los codos, ensanches, angostamientos, válvulas y accesorios.

La presión necesaria en el subsector, considera la presión de trabajo de los emisores y las pérdidas de carga totales hasta el arco de riego (control del sector de riego). En base a las pérdidas de carga y criterios de variación de presión mínima y máxima se definen los diámetros óptimos de las tuberías laterales y portlaterales o terciaria.

En el anexo 3 se muestra un modelo para determinar diámetros óptimos de las distintas tuberías y la pérdida de carga de un sector de riego. Tanto el modelo de presión de trabajo como la demanda hídrica del sistema son complementos de la herramienta principal.

### **3.4.Determinación de la demanda energética del riego.**

Los sistemas de riego a presión necesitan energía para que los emisores realicen un correcto reparto del agua sobre la superficie a regar. Normalmente esta energía hidráulica hay que suministrarla mediante el correspondiente bombeo. El equipo de bombeo y el sistema de riego se diseñan para el periodo crítico o mes de máxima demanda. Las condiciones en que puede trabajar una bomba vienen definidas por sus curvas características, que se obtienen en un banco de ensayo. Así, para un determinado número de revoluciones "n", las tres curvas características de la bomba relacionan la presión de trabajo (H), el rendimiento ( $\eta$ ) y la potencia (P) con el caudal bombeado (Q) [14].

La potencia eléctrica que consume la bomba para suministrar la energía (presión) que necesita el agua viene determinada por:

$$P_e = 9,8 \cdot \frac{Q_i \cdot H_B}{\eta_H \cdot \eta_E} [kW] \quad (7)$$

Donde,

$Q_i$  = Caudal Requerido en el turno de riego [m/s].

$H_B$  = Altura de bombeo del sector[m].

$\eta_H$  = Rendimiento Hidráulico bomba (como decimal) [-].

$\eta_E$  = Rendimiento Eléctrico motor (como decimal) [-].

Un grupo motor-bomba consta de una bomba hidráulica y un motor. El rendimiento del motor, que transforma energía eléctrica en energía mecánica, suele estar en torno al 90-95% [19]. Por su parte, el rendimiento de la bomba, que transforma energía mecánica en energía hidráulica, poseen eficiencias entre el 45% y el 65%, en el caso de las convencionales, mientras que las de alta eficiencia cuentan con eficiencias entre el 60% y 95% [10].

Con la potencia requerida se calcula la demanda de energía diaria, esta es la energía para abastecer el sistema de riego en un día de trabajo y se calcula con la ecuación 8.

$$E_D = P_e \cdot T_R \quad (8)$$

Donde,

$E_D$  = Energía diaria aplicada al riego [kWh].

$P_e$  = Potencia eléctrica Real [kW]

$T_R$  = Horas de riego diarias [hr].

Para sistemas aislados de la red se recomienda un tiempo de riego menor a 5 horas. Un sistema de riego tradicional trabaja entre 8 y 12 horas diarias, que es el caso de los sistemas conectados a la red. En el caso de los sistemas conectados a la red se calcula con un tiempo de riego de 8 horas.

### 3.5. Modelo implementado para el cálculo demanda energética del riego.

La recomendación general para un dimensionamiento adecuado es determinar el caudal, presión de trabajo y programa de riegos basado en las necesidades del cultivo, con esto es posible calcular la potencia de bombeo y la demanda energética diaria, mensual y anual del riego es, en la Tabla 4 se ejemplifica la información necesaria para un dimensionamiento adecuado del sistema FV.

**Tabla 4. Ejemplo de información necesaria para determinar la demanda energética del riego.**

Sector	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Presión [m.c.a]	Tiempo de riego [hr]	Días de riego											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	7	14	3	31	25	20	0	0	0	0	8	12	15	20	25
2	7	14	3	31	25	20	0	0	0	0	8	12	15	20	25
3	12	18	2	31	25	20	0	0	0	0	8	12	15	20	25

Para cada sector de riego la demanda energética mensual se determina en base a los días de riego del mes  $D_{r,j}$  y la energía diaria demandada por el sistema en el mes.

$$E_{demanda,j} = D_{r,j} \sum_{i=inicio}^{fin} E_{D,j} \quad (9)$$

Donde  $E_{D,j}$  corresponde a la demanda horaria del sistema un mes  $j$ , dada por la potencia eléctrica definida por el caudal y la presión del sector y las horas de riego. Luego con esto se determina el consumo anual del sistema.

Para el cálculo de la demanda energética del sistema de riego solar fotovoltaico, se utilizarán los factores óptimos de eficiencia hidráulica y eficiencia eléctrica con los que se podría contar para el diseño eficiente de un sistema de riego [20], con esto se reduce considerablemente la cantidad de módulos solares a instalar y se incentiva el uso racional del agua y de la energía.

- Eficiencia hidráulica:  $n_H = 0,5$

- Eficiencia eléctrica:  $n_H = 0,9$

Con estos valores se calculará la demanda energética del riego considerando la distribución por mes de la evapotranspiración potencial de la zona.

### **3.6.Dimensionamiento del generador fotovoltaico.**

Un problema para la implementación de la energía fotovoltaica es la obtención de datos solares de fuentes fiables y contrastadas a nivel nacional. Para este propósito se utiliza la herramienta online “Explorador de Energía Solar” desarrollado por el Ministerio de Energía de Chile [21].

Las necesidades de riego son mayoritariamente estacionales, mientras que la producción fotovoltaica se da a lo largo del año. Debido a ello, los sistemas fotovoltaicos aislados de la red deben ser dimensionados para el periodo de mayor demanda, quedando sobredimensionados, o incluso sin uso, durante gran parte del año. En el caso del sistema de riego solar conectados a red, la instalación fotovoltaica se dimensiona para los requerimientos de energía anuales, y que, en caso de exceso o escasez de producción eléctrica, la red sirve de sistema de intercambio.

#### **3.6.1. Sistema On-grid**

El principal criterio aplicado al diseño del riego solar para un dimensionamiento adecuado es el de cubrir el 100% de los costos energéticos anuales asociados al sistema de riego. Para dimensionar la potencia del generador fotovoltaico on grid, utilizaremos la siguiente formula:

$$P_{FV} = \frac{E_A \cdot 1,2}{E_{1FV}} \cdot 1 [kWp] \quad (10)$$

Donde,

$P_{FV}$  = Potencia fotovoltaica [kWp].

$E_A$  = Energía anual demanda por el riego [kWh/año]

$E_{1FV}$  = Energía anual [kWh] generada por un panel FV de 1 [kWp] en el lugar del proyecto.

Considerando:

- Angulo de inclinación de los módulos FV = Latitud ° - 10° (Para maximizar generación anual).
- Factor de pérdidas de los módulos FV (ver modelo fotovoltaico).
- Eficiencia del inversor nominal % (Catalogo).

### 3.6.2. Sistema Off-grid.

El sistema debe garantizar un caudal y presión de trabajo mínimo para que los emisores mantengan la uniformidad en riego y cada planta obtenga el volumen de agua diario necesario para su correcto desarrollo. Por esta razón, el sistema de riego off-grid se debe dimensionar para trabajar durante las horas más efectivas de sol, es decir, entre las 10:00 y las 15:00 horas. Las horas fuera de ese rango quedan disponibles como factor de seguridad.

Para dimensionar los módulos fotovoltaicos y bomba solar más adecuados a las necesidades de riego se considerarán los periodos de la temporada de riego más deficitarios en recurso solar y más demandantes de riego. Estos son:

- Día promedio del mes de inicio y finalización de la temporada de riego (septiembre-abril)
- Día promedio del mes de máxima demanda de riego (enero)

Para dimensionar la potencia del generador fotovoltaico del riego solar aislado, utilizaremos la siguiente expresión:

$$P_{FV} = \frac{(E_D/h_r) \cdot 1,2}{P_{1FV}} \quad (11)$$

Donde,

$P_{FV}$  = Potencia fotovoltaica necesaria para cubrir la demanda diaria de riego [kWp].

$E_D$  = Energía diaria en el mes de máxima demanda de riego [kWh]

$h_r$  = horas riego solar (5 horas).

$P_{1FV}$  = La potencia eléctrica promedio de un sistema de 1[kWp] en el mes de máxima demanda, entre las 10:00 y 11:00 (AM) en el lugar del proyecto en [kW].

Considerando:

- Angulo de inclinación de los módulos FV = Latitud ° - 10° (Para maximizar generación anual).
- Factor de pérdidas de los módulos FV (modelo Dobos, ver ítem 3.7)

En las ecuaciones 11 y 12 se agrega un factor de seguridad energética del 20% o 1,2. El valor de  $P_{1FV}$  para sistemas off-grid y el de  $E_{1FV}$  en el caso on-grid se obtiene realizando una simulación en el modelo fotovoltaico desarrollado, utilizando las consideraciones mencionadas.

### **3.7.Modelo del sistema fotovoltaico.**

La potencia de salida proporcionada por el arreglo fotovoltaico varía especialmente debido a las diferentes condiciones de radiación solar y temperatura. De hecho, esos parámetros previos afectan a la curva característica de los módulos fotovoltaicos. El modelo dinámico del sistema fotovoltaico consideró la estimación de la salida de potencia horaria del conjunto solar  $P_{DC}$ , dependiendo de la radiación de directa por hora  $G_b$  y la radiación difusa  $G_d$ , temperatura ambiente  $T_a$ , la velocidad del viento  $v_w$ , ángulo de incidencia  $\theta$  (Ver anexo 4, ángulos solares).

Dentro de los factores que afectan el comportamiento de una instalación fotovoltaica, la reflexión de la radiación en la cubierta del panel es uno de los elementos que resulta relevante en cuanto a pérdidas. El parámetro que caracteriza la pérdida por reflexión se denomina modificador del ángulo de incidencia ( $K_{\tau\alpha}$ ). La cantidad reflejada depende del material de la cubierta y del espesor de ésta.



El modelo físico de cálculo del modificador de ángulo de incidencia se basa en la propuesta de De Soto [22]. Primero, es necesario definir el ángulo de refracción en la cubierta:

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin(\theta)\right) \quad (12)$$

Dónde  $n$  es el índice de refracción de la cubierta de vidrio, cuyo valor típico es de 1.526, y 1 corresponde al índice de refracción del aire [22]. El modificador  $K_{\tau\alpha}$  se puede calcular mediante la relación entre la transmitancia del ángulo de incidencia del sol sobre el panel  $\theta$  y la transmitancia de un rayo normal al sol ( $\theta = 0^\circ$ ).

$$K_{\tau\alpha} = \frac{\tau(\theta)}{\tau(0)} \quad (13)$$

Una aproximación de la transmitancia del sistema considerando tanto las pérdidas por reflexión en la interfaz como la absorción dentro del vidrio es:

$$\tau(\theta) = e^{-\left(\frac{KL}{\cos \theta_r}\right)} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right) \right] \quad (14)$$

Donde  $K$  es el coeficiente de extinción del acristalamiento y  $L$  es el espesor del acristalamiento. En este estudio se supone que el valor de  $K$  es de  $4 \text{ m}^{-1}$ , el valor para el vidrio "blanco de agua" y el grosor de acristalamiento se supone que es de 2 mm, un valor razonable para la mayoría de los paneles de células fotovoltaicas [22]. El índice de refracción se establece en 1,526, el valor para el vidrio.

$$\tau(\theta) = e^{-(KL)} \left[ 1 - \left( \frac{1-n}{1+n} \right)^2 \right] \quad (15)$$

El factor principal que afecta a la potencia de salida de un dispositivo fotovoltaico es la radiación solar absorbida en la superficie de la célula,  $S$ . Los datos de radiación no se conocen normalmente en el plano del panel fotovoltaico, por lo que es necesario estimar la radiación solar absorbida por la celda fotovoltaica utilizando datos horarios horizontales. Para esto se utiliza la información proporcionada por el explorador solar [21], que para una ubicación particular entrega la radiación global horizontal  $G_h$ , la

radiación directa horizontal  $G_{bh}$ , la radiación difusa horizontal  $G_{dh}$ , la temperatura ambiente  $T_a$ , la velocidad del viento  $v_w$ . Luego la radiación incidente en la celda fotovoltaica se calcula mediante la siguiente ecuación para un modelo isotrópico.

$$S = (\tau\alpha)_n [G_{bh}R_{beam}K_{\tau\alpha,b} + G_{dh}K_{\tau\alpha,d} \frac{(1+\cos\beta)}{2} + G_g\rho K_{\tau\alpha,g} \frac{(1-\cos\beta)}{2}] \quad (16)$$

Donde  $\rho$  es el albedo (reflectancia) del suelo,  $\beta$  es el ángulo de inclinación del panel,  $K_{\tau\alpha,b}$  es el modificador del ángulo de incidencia en el ángulo de incidencia del haz,  $K_{\tau\alpha,d}$  y  $K_{\tau\alpha,g}$  son los modificadores del ángulo de incidencia en ángulos de incidencia efectivos para la radiación isotrópica difusa y reflejada en el suelo, y  $R_{beam}$  es la relación de la radiación directa sobre una superficie inclinada y la de una superficie horizontal. Otro de los factores que afecta de forma importante el rendimiento de una celda fotovoltaica corresponde a su temperatura. Se ha utilizado el modelo de King et al [23] para calcular la temperatura de la celda fotovoltaica ( $T_C$ ), la cual depende de la temperatura del panel ( $T_P$ ). La temperatura de la celda (ecuación 17) y del panel (ecuación 17) son calculadas en función de la radiación incidente ( $S$ ), la temperatura ambiente ( $T_a$ ), la velocidad del viento ( $V$ ), el material del panel y las condiciones de ventilación de la instalación, que variará si el panel está instalado sobre una superficie, como un techo o pared, o sobre una estructura aislada en altura, que permite una mejor ventilación del panel.

$$T_C = T_P + \frac{S}{1000} \cdot \Delta T \quad (17)$$

$$T_P = S \cdot e^{a+b \cdot V} + T_a \quad (18)$$

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre la celda y la superficie posterior del módulo a un nivel de irradiancia de 1000 [ $W/m^2$ ]. Se utilizan los coeficientes del caso “open rack cell glassback” ( $a: -3.47$ ,  $b: -0.0594$ ,  $\Delta T: 3$ ) en el caso de un montaje aislado y “roof mount cell glassback” ( $a: -2.98$ ,  $b: -0.0471$ ,  $\Delta T: 1$ ) en el caso de un montaje paralelo al techo [23].

El modelo para el cálculo de potencia está basado en el modelo de Dobos [24] desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). La ecuación

que calcula la potencia generada por el panel fotovoltaico cambia si la radiación incidente es mayor o menor a  $125 [W/m^2]$ . La potencia generada ( $P_{DC0}$ ) para ambas situaciones está dada por:

$$P_{DC} = \begin{cases} \frac{S}{S_{ref}} \cdot P_{DC0} \cdot (1 + \gamma(T_C - T_O)), & S \geq 125 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \\ \frac{0.008 \cdot S^2}{S_{ref}} \cdot P_{DC0} \cdot (1 + \gamma(T_C - T_O)), & S < 125 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \end{cases} \quad (19)$$

Dónde  $S$  corresponde a la radiación incidente en la celda,  $S_{ref}$  a la radiación de referencia, típicamente valorada en  $1000 [W/m^2]$ ,  $T_C$  a la temperatura de la celda,  $T_O$  a la temperatura de referencia, típicamente valorada en  $25^\circ \text{C}$ .  $P_{DC0}$  es la potencia peak de la instalación fotovoltaica y el factor  $\gamma$  corresponde al coeficiente de temperatura de la celda para la potencia máxima (proveniente de los catálogos de los fabricantes de paneles solares).

El sistema fotovoltaico consiste en módulos fotovoltaicos conectados en serie o en paralelo según los requisitos de salida de tensión y corriente. El sistema de control de potencia es una interfaz entre los módulos fotovoltaicos y el sistema motor-bomba con la función de mejorar el rendimiento del acoplamiento. El sistema de acondicionamiento de potencia puede ser un convertidor de CC / CC o un inversor de CC/CA según la tecnología de la bomba del motor. En los sistemas conectados a la red se requiere necesariamente una salida CA. Tanto el convertidor CC como el inversor suelen estar equipados con un dispositivo de seguimiento de máxima potencia (MPPT) para maximizar la extracción de potencia de la matriz solar. En este estudio, se adoptaron bombas centrífugas multietapa de CC y CA y los controladores de potencia relacionados con el fin de investigar y comparar los rendimientos, especialmente en términos de consumo de energía, agua bombeada y costos.

El modelo utilizado en este trabajo para el convertidor y el inversor fue basándose en el supuesto de que la potencia de salida de estos es igual a la entrada de energía desde el generador fotovoltaico menos lo inevitable pérdidas de potencia asociadas.

Normalmente la eficiencia varía entre el 80% hasta el 95% dependiendo de las condiciones de trabajo, especialmente temperatura y potencia disponibles.

Las pérdidas de potencia fueron tomadas teniendo en cuenta sobre la base de una eficiencia media de la potencia sistema.

**Tabla 5. Pérdidas del sistema basado en el modelo de Dobos.**

Suciedad	2.0%
Sombras del entorno	3.0%
Imperfecciones de fabricación	2.0%
Cableado	2.0%
Conectores	0,5%
Degradación de las celdas por luz incidente	1,5%
Tiempo de apagado	3.0%
Diferencias con los valores de laboratorio	1.0%
<b>Pérdida total (P<sub>T</sub>)</b>	<b>14.0%</b>

**Fuente: Manual PVWatts NREL 2014 [24].**

La potencia fotovoltaica horaria, producida por el sistema incluyendo las pérdidas totales mostradas en la Tabla 5 es:

$$P_{FV,i} = \eta P_{DC} (1 - P_T) \quad (20)$$

Donde  $\eta$  corresponde a la eficiencia del inversor o del controlador de corriente continua (CC) según corresponda.

Todas las variables con el subíndice  $i$ , corresponden a un valor horario. La energía mensual generada por el sistema en un mes  $j$  con  $D_{mes,j}$  días está dada por:

$$E_{mes,j} = D_{mes,j} \cdot \sum_{i=0}^{23} (P_{FV,i} \cdot 1[hr]) \quad (21)$$

La energía generada anual está dada por

$$E_{gen,ansual} = \sum_{j=1}^{12} E_{mes,j} \quad (22)$$

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico aplicado a riego, se realiza una simulación con una capacidad instalada de 1[kWp], es decir.

$$P_{DC0} = 1000 [Wp]$$

Con las consideraciones mencionadas y las relaciones vistas en la metodología se determina la potencia calculada a instalar  $P_{FV,sistema}$ . Luego utilizando la siguiente relación se determina el número de paneles.

$$N_{paneles} = \frac{P_{FV,calculada}[Wp]}{P_{nom,panel} [Wp]} \quad (23)$$

En caso de no ser un valor entero, este valor se aproxima hacia el entero superior, luego la potencia fotovoltaica dimensionada es:

$$P_{FV} = P_{nom,panel} N_{paneles} \quad (24)$$

### **3.8. Balance energético.**

Una vez determinado el número de paneles a instalar, se realiza simulación con la potencia disponible para el sistema lo que nos permite evaluar energéticamente la instalación, estimando la energía autoconsumida, inyectada a la red y ahorros generados por el sistema.

#### **3.8.1. Sistema conectado de la red**

Si la energía eléctrica demandada ( $E_h$ ) por el sistema en un bloque horario es **mayor** que la generada por el sistema fotovoltaico ( $P_{FV,i} 1[hr]$ ) se contabiliza consumo de la red. Esto es necesario pues el consumo bajo la actual normativa tiene distinto valor al de las inyecciones a la red.

$$Si E_h > E_{FV}$$

$$E_{cons,i} = (P_{e,i} - P_{FV,i}) 1[hr] \quad (25)$$

Previamente se construye una curva de demanda de para generar los valores de  $P_{e,i}$ , que es igual a 0 cuando no hay riego e igual a  $P_e$  desde la hora de inicio y hasta la hora de termino definida para el riego. La energía autoconsumida en este caso corresponde a la fracción aportada por el sistema fotovoltaico.

$$E_{a1,i} = P_{FV,i} 1[hr] \quad (26)$$

Si la energía eléctrica demandada ( $E_h$ ) por el sistema en un bloque horario menor o igual que la generada por el sistema fotovoltaico ( $P_{FV,i} 1[hr]$ ) se contabiliza inyección a la red.

$$Si E_h < E_{FV}$$

$$E_{inyec,i} = (P_{FV,i} - P_{e,i}) 1[hr] \quad (27)$$

La energía autoconsumida en este caso corresponde a la fracción aportada energía consumida por el sistema  $E_{h,i}$ .

$$E_{a2,i} = E_{h,i} \quad (28)$$

La energía inyectada a la red los días en que no se riega ( $D_{mes,j} - D_{r,j}$ ), corresponde a la energía generada por el sistema en el dia promedio del mes j. Luego la energía inyectada mensual está dada por.

$$E_{inyec,j} = D_{r,j} \cdot \sum_{i=0}^{23} E_{inyec,i} + (D_{mes,j} - D_{r,j}) \cdot E_{mes,j} \quad (29)$$

Donde  $D_{r,j}$  y  $D_{mes,j}$  corresponden a los días de riego y los días totales del mes  $j$  respectivamente. La energía autoconsumida en el día promedio del mes  $j$  es.

$$E_{a,diaria,j} = \sum_{i=0}^{23} E_{a1,i} + E_{a2,i} \quad (30)$$

Esto de la misma forma que las inyecciones a la red, ocurre solo los días de riego, luego la energía autoconsumida mensualmente es:

$$E_{a,j} = D_{r,j} \cdot E_{a,diaria,j} \quad (31)$$

Cada una de las variables se determinan en base al día promedio y luego se evalúan mensualmente. Finalmente se determina anualmente que en general se realiza de la siguiente forma,

$$Variable_{anual} = \sum_{j=1}^{12} Variable_{mes,j}$$

El costo mensual corresponde a la valorización de los consumos dados por el precio por energía consumida  $P_{cons} [$/kWh]$  y el precio por energía inyectada  $P_{iny} [$/kWh]$ . Dependiendo del tipo de consumidor se pueden agregar precios por potencia contratada, Cargo Único por Uso del Sistema troncal, etc.

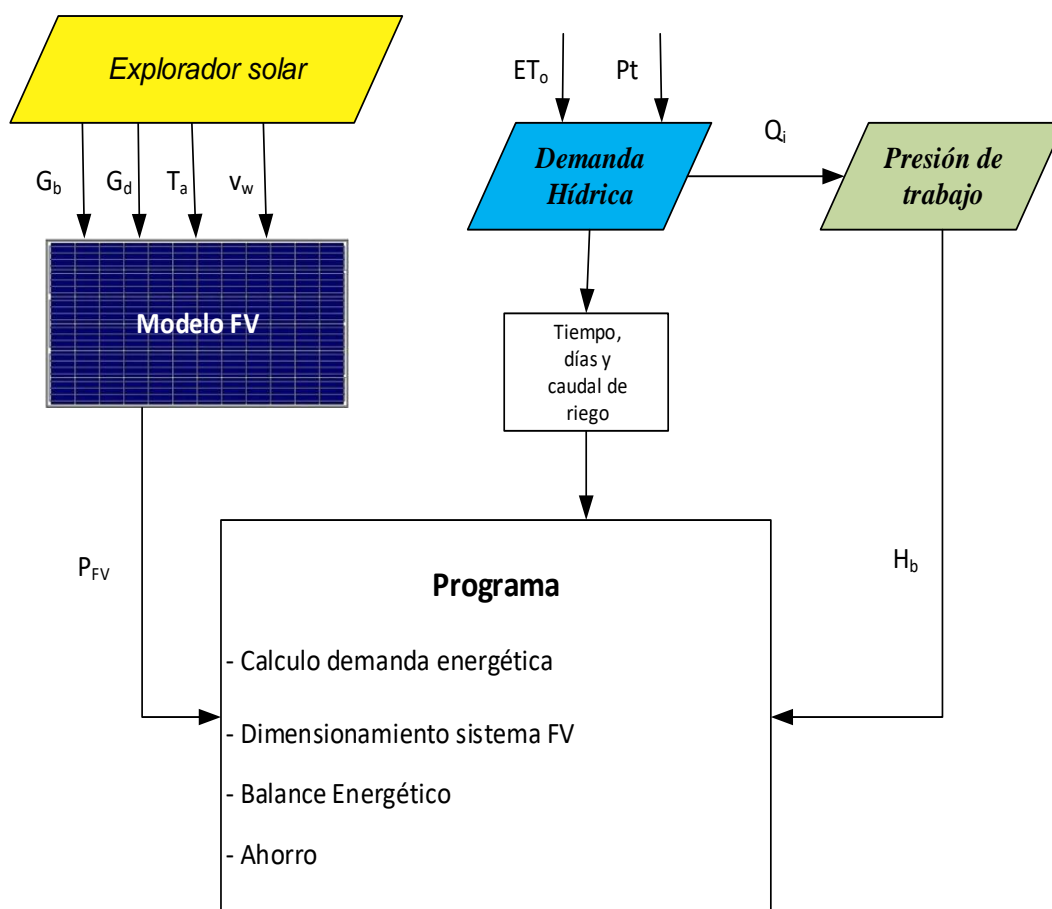
### 3.8.2. Sistema aislado de la red

En este caso la evaluación es más simple pues la energía demandada por el sistema de riego es aportada íntegramente por el sistema fotovoltaico. Luego, la energía diaria autoconsumida es igual a la energía demandada por el sistema de riego y el ahorro generado por el sistema corresponde al costo de dicha energía, al precio por la energía consumida,  $P_{cons,off} [$/kWh]$ , previo a la instalación del sistema. Luego el ahorro del sistema es:

$$A_{mes,j} = P_{cons,off} \cdot D_{r,i} \cdot \sum_{i=0}^{23} E_{h,(i,j)} \quad (32)$$

### 3.9. Modelo Programa.

A continuación, se presenta un diagrama del modelo fotovoltaico aplicado a riego estudiado y los modelos relacionados.



**Diagrama 3. Esquema de la herramienta propuesta para el dimensionamiento de un sistema FV aplicado a riego.**

El programa desarrolla el proceso, de acuerdo a la metodología planteada e integra los modelos indicados en el diagrama 3. El modelo fue implementado en el software Engineering Equation Solver (EES) [25].



La estrategia de dimensionamiento considera la necesidad de agua, las características del sitio, la radiación solar y el tipo de panel, la herramienta permite obtener el tamaño del sistema fotovoltaico, los ahorros o pagos de energía según corresponda. La estrategia para el dimensionamiento adecuado del sistema en cuenta de 4 etapas las que se resumen a continuación.

### **Etapas 1 Demanda hídrica**

Datos de entrada:

- Número de emisores por planta
- N° plantas
- Caudal emisores
- Evapotranspiración potencial mensual
- Coeficiente de cultivo mensual
- Precipitación acumulada mensual.
- Coeficientes de corrección.

Datos entregados (programa de riegos):

- Días de riego por mes.
- Tiempo de riego por mes.
- Caudal de diseño.

### **Etapas 2 Presión de trabajo.**

La determinación de la presión de trabajo proviene del diseño o rediseño de la instalación y requiere de múltiples variables. En el anexo 3 se muestran criterios y un modelo para el diseño de las subunidades de riego y criterios para la selección de diámetros apropiados. Un sistema con más de un sector de riego puede tener más de un punto de operación como se mencionó anteriormente. De acuerdo al tipo de control, válvula de estrangulación, regulación por by-pass o variador de frecuencia afecta la presión de trabajo requerida por el sistema de riego. Del punto de vista energético es más eficiente usar un variador de frecuencia.

Independiente del programa utilizado para el diseño del sistema de riego, la variable principal a determinar en este caso es la presión del sector de riego  $H_b(Q_i)$ , para suministrar el caudal de trabajo  $Q_i$ .

### **Etapas 3 Demanda Energética.**

Datos de entrada:

- Días de riego por mes.
- Tiempo de riego por mes.
- Caudal de diseño por sector.
- Presión de trabajo por sector
- Eficiencia hidráulica y eléctrica.

Datos entregados:

- Potencia de bombeo.
- Energía demandada por el sistema diaria, mensual y anual.

### **Etapas 4 Dimensionamiento del sistema FV, balance energético, estimación de ahorros.**

Datos de entrada:

- Radiación horizontal directa y difusa.
- Temperatura ambiente y velocidad del viento.
- Potencia de bombeo.
- Caudal de diseño por sector.
- Presión de trabajo por sector
- Eficiencia hidráulica y eléctrico.

Datos de entregados

- Energía generada día promedio, mensual y anual
- Inyecciones a la red.
- Consumos desde red.
- Costo mensual y anual del sistema on-grid
- Ahorro del sistema off-grid
- Porcentaje de energía autoconsumida.

## **CAPÍTULO 4: PRUEBA DE LA HERRAMIENTA.**

Para probar la herramienta, en esta sección se dimensionan 4 unidades demostrativas (UDE) donde se emplean sistemas solares fotovoltaicos en dos cultivos de uva de mesa (zona norte) y dos de frutilla (zona sur), y establecer la correlación que esta tiene con la superficie plantada. El análisis no es puramente teórico, pues estos son proyectos reales y fueron desarrollados en el marco del proyecto “Tecnologías Innovadoras para mejorar la eficiencia energética (EE) y uso de energías renovables no convencionales (ERNC) en el sector fruta fresca en Chile”. Los 4 sistemas son tamaños distintos de superficie plantada. En cada zona se desarrolla un modelo aislado (off-grid) y uno conectado a la red (on-grid). La ubicación de cada unidad demostrativa experimental de riego solar se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6. Ubicación de unidades demostrativas experimentales de riego solar.**

	<b>Zona Norte</b>		<b>Zona Sur</b>	
	<b>UDE 1</b>	<b>UDE 2</b>	<b>UDE 3</b>	<b>UDE 4</b>
<b>Ubicación</b>	Punta Negra, Vallenar, Región de Atacama, Chile.	Perales Sur, Vallenar, Región de Atacama, Chile.	Chovellen, Pelluhue, Cauquenes, Región del Maule, Chile	Polhuín, Chanco, Cauquenes, Región de Maule, Chile.
<b>Coordenada GPS [UTM]</b>	6.850.425 m N – 362.461 m E	6.809.078 m N – 371.061 m E	6.024.554 m N – 710.224 m E	6.036.350 m N – 724.115 m E
<b>Modelo Energetico</b>	On-grid	Aislado de Red	On-grid	Aislado de Red

<b>Cultivo</b>	Uva de mesa	Uva de mesa	Frutilla	Frutilla
----------------	-------------	-------------	----------	----------

Para los UDE1 y UDE2 en el mes de máxima demanda la frecuencia de riego es de 1 día lo que significa un tiempo de riego de 8 horas para el sistema on-grid y de 5 horas para el caso aislado de la red.

Para los UDE de la zona sur la frecuencia de riego es de 2 días y el tiempo de riego es de 8 horas para el sistema on-grid y de 5 horas para el off-grid en el mes de máxima demanda.

**Tabla 7. Necesidades de riego diarias, superficie plantada y tiempo de riego.**

	<b>UDE 1</b>	<b>UDE 2</b>	<b>UDE 3</b>	<b>UDE 4</b>
<b>Hectáreas [ha]</b>	0,8	0,87	2,5	0,5
<b>Caudal [m<sup>3</sup>/h]</b>	56	61	112	23
<b>Tiempo de riego [h]</b>	8	5	8	5

Para la determinación de la demanda hídrica se considera el cultivo en edad adulta. Dado que se desconoce el porcentaje de sombreado y además este varía según la etapa de desarrollo, se considera un rango de cobertura de [0,7-0,9] para el cultivo de uva, de acuerdo al modelo propuesto por Sellés et al. [26] que correlaciona el valor de  $K_c$  con el porcentaje de sombra que presenta el parronal (ver anexo 2) . Para el caso de las frutillas se utiliza un porcentaje fijo de 50% considerando lo expuesto en el manual de frutilla [18]. Para el coeficiente de lavado se evalúa el caso con los límites admisibles para un adecuado desarrollo del cultivo, que para la conductividad eléctrica del agua y del extracto de suelo corresponde a 0,8[dS/m] y 2[dS/m] respectivamente. Con esto se tiene un requerimiento de lavado de un 20%. La evapotranspiración potencial, la precipitación acumulada mensual y el coeficiente de cultivo se detallan en el anexo 5. En base a lo anterior se calcula la demanda hídrica mensual y anual de los sistemas.

**Tabla 8 Demanda hídrica calculada para cada UDE de riego solar.<sup>1</sup>**

	<b>Demanda Hídrica Mensual [m<sup>3</sup>/mes]</b>			
	<b>Zona Norte</b>		<b>Zona Sur</b>	
	Uva de mesa		Frutilla	
	<b>UDE 1</b>	<b>UDE 2</b>	<b>UDE 3</b>	<b>UDE 4</b>
<b>Hectáreas [ha]</b>	0,80	0,87	2,50	0,50
Enero	1064	1159	1344	276
Febrero	672	732	1008	207
Marzo	392	427	672	138
Abril	0	0	112	23
Mayo	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	224	244	0	0
Septiembre	448	488	672	138
Octubre	784	854	784	161
Noviembre	1400	1525	1344	276
Diciembre	1624	1769	1568	322
<b>Total</b>	<b>6608</b>	<b>7198</b>	<b>7504</b>	<b>1541</b>

Se calculan las pérdidas de carga (fricción y singularidades) para diferentes combinaciones de diámetros y longitudes de tuberías. utilizando criterios de diseño preestablecidos, considerando, por ejemplo, emisores de menor presión de trabajo, o disminuyendo las pérdidas de carga en redes hidráulicas, incrementando los diámetros de tubería, o usando filtros que trabajan con menores presiones. Finalmente se define una determinada combinación, que genera requerimientos de presión óptima, para el caudal necesario. La presión de trabajo calculada para cada sistema de riego se detalla en la Tabla 9.

---

<sup>1</sup> Tener en cuenta la siguiente relación: 1[mm] = 10[m<sup>3</sup>/ha]

**Tabla 9. Presión de trabajo sistema de riego UDE de riego solar.**

<b>Código de identificación</b>	<b>Manometric head [m.c.a]</b>			<b>Presión de trabajo [m.c.a]</b>
	<b>Emisores de riego</b>	<b>Desnivel topográfico</b>	<b>Perdidas de carga (roce)</b>	
<b>UDE 1</b>	10	1	3	<b>14</b>
<b>UDE 2</b>	10	1	3	<b>14</b>
<b>UDE 3</b>	10	32	5	<b>47</b>
<b>UDE 4</b>	10	1	3	<b>14</b>

Para las unidades demostrativas de riego solar se utilizaron emisores NGE modelo integrado en la línea de emisión de los laterales de riego y auto-compensado con una presión nominal de funcionamiento de 30 [m.c.a], con una presión recomendada de trabajo de 5 a 30 [m.c.a] y caudal nominal de 4 [L/h]. Estos sistemas tienen una eficiencia de aplicación de 85-95% [27] y la variación del caudal es mínima al variar la presión de operación, lo que permite lograr la uniformidad adecuada en el riego. La uniformidad de un sistema de riego debe ser alta para asegurar que gran parte del cultivo reciba una cantidad adecuada de agua. Esto es necesario para que los campos produzcan altos rendimientos y tengan una pérdida mínima de nutrientes debido a la percolación profunda [28].

Luego para cada unidad de riego se conoce la presión, el caudal de trabajo y el tiempo de riego. Con la ecuación 8 se determina la energía consumida diariamente. Tomando en cuenta los días de riego, luego se estima la energía demandada por el sistema de riego por mes y anualmente.

**Tabla 10 Demanda energética mensual calculada para cada UDE de riego solar.**

	<b>Zona norte</b>		<b>Zona Sur</b>	
	Uva de mesa		Frutilla	
	<b>UDE 1</b>	<b>UDE 2</b>	<b>UDE 3</b>	<b>UDE 4</b>
<b>Energía diaria mes de máxima demanda [kWh/día]</b>	4,84	4,84	14,51	2,0
<b>Energía anual [kWh/año]</b>	<b>571,10</b>	<b>622,0</b>	<b>1557,10</b>	<b>133,20</b>

Con este dato se realiza una simulación en base a un sistema de 1 [kWp] para determinar la potencia instalada de módulos solares necesaria para satisfacer la demanda energética, de acuerdo con los criterios de dimensionamiento definidos. En la Tabla 11, se muestra la potencia fotovoltaica requerida para cada UDE de riego solar.

**Tabla 11. Potencia fotovoltaica calculada para cada UDE de riego solar.**

<b>Potencia fotovoltaica instalada para cada UDE de riego solar</b>			
<b>Zona Norte</b>		<b>Zona Sur</b>	
Uva de mesa		Frutilla	
<b>UDE 1</b>	<b>UDE 2</b>	<b>UDE 3</b>	<b>UDE 4</b>
<b>Modelo energético del riego</b>			
On-grid	Off-grid	On-grid	Off-grid
<b>Demanda energética del riego</b>			
Anual [kWh]	Diaria en el mes de máxima demanda [kWh/día]	Anual [kWh]	Diaria en el mes de máxima demanda [kWh/día]
571,1	4,84	1555,1	1,99
<b>Dato obtenido de la herramienta sistema 1[kWp]</b>			
Generación FV total anual [kWh/año]	Diciembre 10:00 - 10:59 [kWh]	Generación FV total anual [kWp]	Diciembre 10:00 - 10:59 [kWh]
1875	0,62	1527	0,53
<b>Potencia calculada FV según metodología [Wp]</b>			
365,5	1873,4	1222,1	900,1
<b>Potencia nominal [Wp]</b>			
460	2070	1380	920

Para el cálculo se consideraron módulos fotovoltaicos con celdas policristalinas con una potencia nominal de 230 [kWp] y un coeficiente de temperatura para la potencia máxima de  $-0,41$  [%/°C]. Tanto para el inversor (DC/AC) para el sistema on-grid como en convertidor (DC/DC) para el sistema off-grid se considera una eficiencia nominal de un 95% [29].

#### **4.1. Resultados del dimensionamiento Zona norte.**

En la Región de Atacama que posee una radiación promedio anual de 3400 [kWh/m<sup>2</sup>] se evaluaron dos sistemas de riego alimentados con energía solar fotovoltaica, que cubren superficies similares. El sistema de riego conectado a la red abastece diariamente 56 [m<sup>3</sup>/día] a una presión de trabajo de 14 [m.c.a], lo que genera una demanda energética de 4,8 [kWh/día] en el mes de máxima demanda y 571,1 [kWh/año].

Basados en los datos de radiación solar del Explorador de Energía Solar del Ministerio de Energía de Chile y considerando orientación norte con un ángulo de inclinación de los módulos solares de 18° para maximizar la generación energética anual, se establece que con una potencia FV instalada de 480 [Wp] se producen en el mes de enero 75,1 [kWh] y 862 [kWh] anuales, lo que cubre el 45,9% de la demanda energética del riego en el mes de máxima demanda y el 100% de los costos asociados a la gestión energética anual del sistema de riego.

La siguiente tabla describe una simulación de la gestión energética anual del sistema de riego y el sistema solar fotovoltaico de 480 [Wp] considerando, la demanda energética mensual del riego, generación del sistema fotovoltaico, la energía autoconsumida, consumo energético de la red local cuando la demanda energética del riego supera la generación FV; y la energía inyectada a la red cuando la generación FV supera la demanda energética del riego.



Tabla 12. Simulación anual del sistema conectado a la red de 480 [Wp].

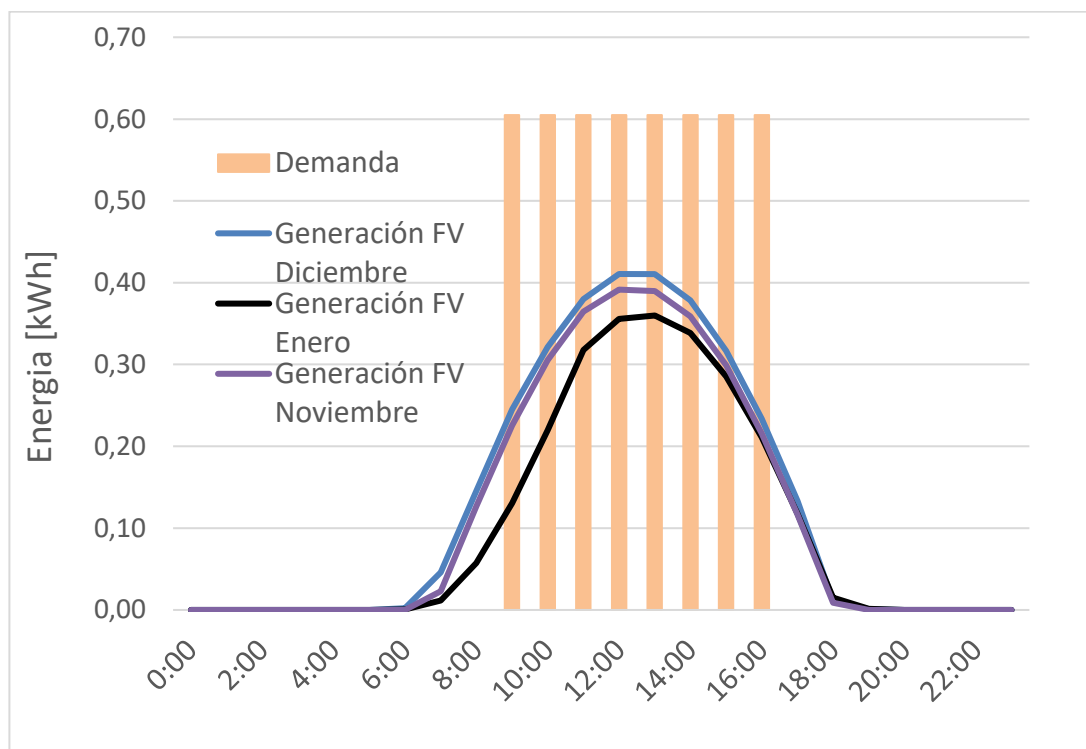
	<b>Demanda de energía [kWh]</b>	<b>Energía generada [kWh]</b>	<b>Autoconsumida [kWh]</b>	<b>Inyectada [kWh]</b>	<b>Consumida [kWh]</b>
<b>Enero</b>	91,95	75,10	42,20	32,92	49,80
<b>Febrero</b>	58,07	85,60	32,30	53,25	25,70
<b>Marzo</b>	33,88	93,50	18,70	74,78	15,20
<b>Abril</b>	0,00	81,90	0,00	81,94	0,00
<b>Mayo</b>	0,00	68,40	0,00	68,38	0,00
<b>Junio</b>	0,00	49,50	0,00	49,51	0,00
<b>Julio</b>	0,00	45,80	0,00	45,78	0,00
<b>Agosto</b>	19,36	48,70	6,00	42,75	13,40
<b>Septiembre</b>	38,72	58,40	14,80	43,66	23,90
<b>Octubre</b>	67,75	76,30	32,40	43,88	35,40
<b>Noviembre</b>	120,99	84,80	63,80	21,00	57,20
<b>Diciembre</b>	140,35	94,10	78,20	15,90	62,10
<b>Anual</b>	<b>571,10</b>	<b>862,0</b>	<b>288,30</b>	<b>573,70</b>	<b>282,80</b>

Existe una diferencia entre la energía demanda por el riego y la producción solar que se equilibra cuando valorizamos los costos asociados al consumo eléctrico de la red Tarifa BT 1 (282,8 [kWh] consumidos de red) y el pago por energía inyectada a la red como excedente de la producción solar (573,7 [kWh]). En este caso el agricultor obtiene un ingreso anual de \$3.302, desarrollando una gestión energética eficiente entre lo que autoconsume del sistema FV y de la red eléctrica, y lo que inyecta como excedente FV.

Tabla 13. Valorización de los consumos e inyecciones de acuerdo a tarifas de Emelat (BT 1).

	<b>Inyecciones [\$]</b>	<b>Consumo [\$]</b>	<b>Pago [\$]</b>
<b>Enero</b>	2.337	5.434	3.096
<b>Febrero</b>	3.781	3.311	-469
<b>Marzo</b>	5.309	2.380	-2.930
<b>Abril</b>	5.818	1.041	-4.777
<b>Mayo</b>	4.855	1.041	-3.814
<b>Junio</b>	3.515	1.041	-2.474
<b>Julio</b>	3.250	1.041	-2.209
<b>Agosto</b>	3.035	2.221	-814
<b>Septiembre</b>	3.100	3.153	53
<b>Octubre</b>	3.115	4.160	1.044
<b>Noviembre</b>	1.491	6.088	4.597
<b>Diciembre</b>	1.129	6.523	5.394
<b>Anual</b>	<b>40.735</b>	<b>37.433</b>	<b>-3.302</b>

En el gráfico 1, se aprecia la gestión energética diaria del riego solar en autoconsumo, conectada a la red eléctrica local en los meses de máxima demanda (noviembre, diciembre, enero). Describe la gestión energética eficiente diaria (24 horas) del riego solar considerando la demanda energética horaria del riego, la generación del sistema fotovoltaico; energía inyectada a la red cuando la generación FV supera la demanda energética horaria del riego y; consumo energético de la red local cuando la demanda energética del riego supera la generación FV (horas extremas). Esto se realiza de manera automática.



**Gráfico 1 Gestión energética diaria (hora local) del riego solar en autoconsumo, del UDE 1.**

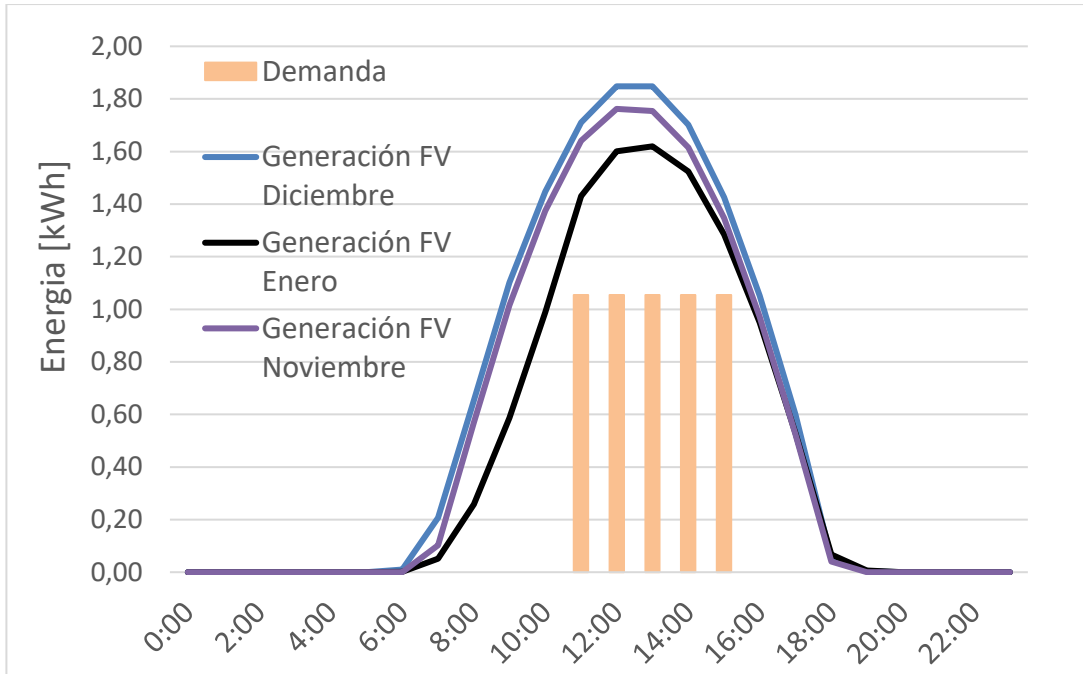
Se puede observar cómo la producción solar se mantiene como base del consumo energético logrando un 90% de autoconsumo en un día de riego, en especial medida porque el riego es realizado tradicionalmente en las horas de luz solar donde el agua interactúa con la fisiología de la planta o cultivo. Si bien, en este caso la demanda en el riego es mayor a la energía generada por el sistema fotovoltaico, esto se compensa con las inyecciones a la red, realizadas en los días que no se riega en los meses de menor demanda y en aquellos en que no se riega.

El sistema de riego aislado de la red abastece diariamente 61 [m<sup>3</sup>/día] a una presión de trabajo de 14 [m.c.a], lo que genera una demanda energética de 4,8[kWh/día] en el mes de máxima demanda y 622 [kWh/año]. El Sistema fotovoltaico aislado de la red (off grid) donde el sistema energético solar alimenta exclusivamente al sistema de riego como única fuente de energía. El sistema de riego fotovoltaico está integrado por: Estructura soportante, módulos fotovoltaicos, controlador solar de bomba, bomba solar con motor de alta eficiencia y elementos de seguridad.

Basados en los datos de radiación Explorador de Energía Solar de Chile y la herramienta elaborada, se establece que con una potencia FV instalada de 2070 [kWp] se producen 1,44 [kWh] a las 10 horas del día promedio del mes de diciembre (máxima demanda hídrica), lo que cubre la demanda energética del riego en el mes de máxima demanda y toda su temporada anual.

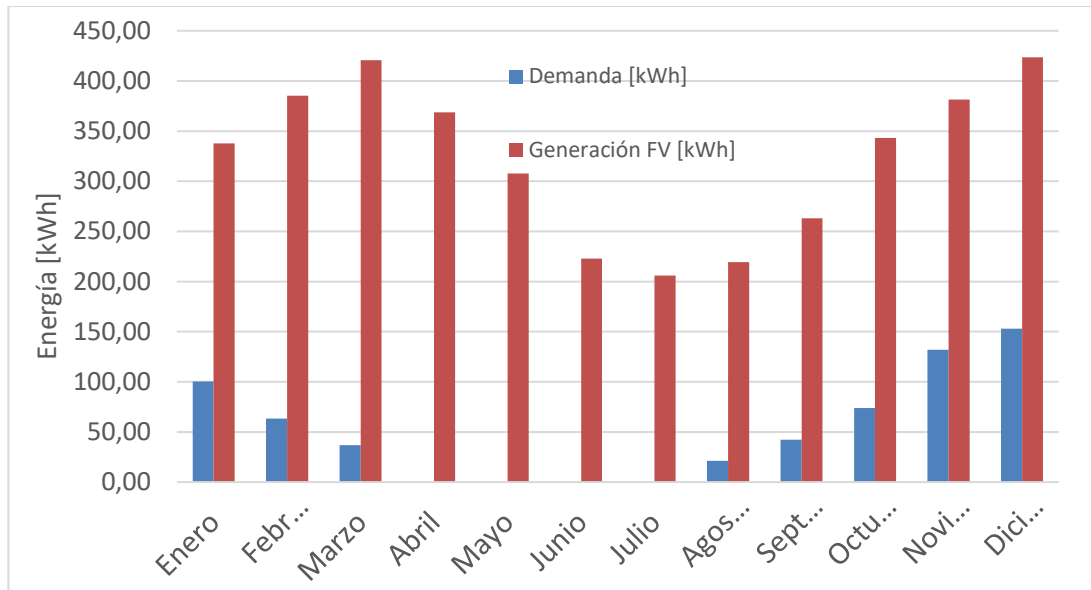
En el Grafico 2, se aprecia la gestión energética diaria del riego solar directo aislado. Se puede observar que el sistema satisface eficazmente el 100% de la demanda diaria de energía para el riego, sin embargo, más del 50% de la energía solar generada diariamente, se disipa como presión sin generar trabajo útil de riego. Si además consideramos que el riego es una actividad estacional que se realiza durante 6 o 7 meses en el año y que solo 2 o 3 de estos meses de manera intensiva (todos los días), tenemos que más del 80% de la energía anual que genera el riego solar no produce trabajo útil.

A continuación, se presenta el desempeño en temporada anual (producción energética) del sistema de riego fotovoltaico de 2070 [Wp].



**Gráfico 2. Gestión energética diaria (hora local) del riego solar directo aislado, del UDE 2.**

Tomando en cuenta los parámetros y criterios para el dimensionamiento de un sistema off-grid se entrega grafico con la simulación de la demanda energética de riego, producción de módulos FV con una capacidad instalada para la temporada de riego anual de la Agricultor del UDE 2.



**Gráfico 3. Simulación anual del sistema fotovoltaico UDE 2 aislado de la red de 2070 [Wp].**

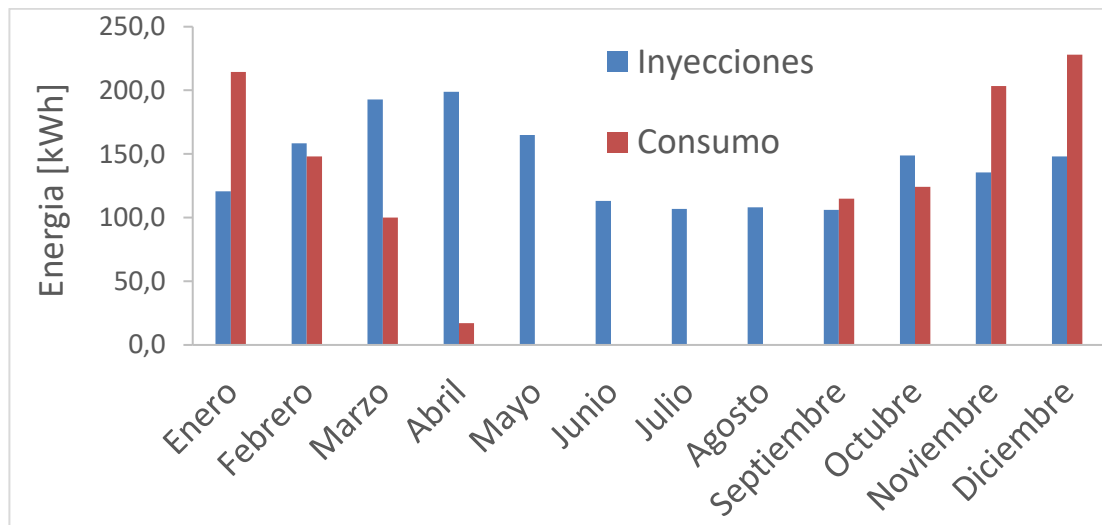
De acuerdo con los resultados anuales solo un 16% de la energía total generada por el sistema off-grid es autoconsumida. En diciembre se logra autoconsumir un 36% que corresponde al mes de máxima demanda. Esto hace evidente la necesidad de optimizar el sistema con el fin de aumentar el porcentaje de autoconsumo, lo que de acuerdo a las variables analizadas se puede realizar de tres formas. La primera opción es dimensionar el sistema para un inicio de riego a las 11 horas, lo que en este caso es posible porque la demanda de riego es máxima en verano y se tienen más de 5 horas disponibles para el riego. Con esto se logra un sistema de menor tamaño con las mismas horas de riego al considerar una potencia fotovoltaica mayor al inicio del riego. Basado en lo anterior, un mayor tiempo de riego disponible permitiría disminuir el caudal de los emisores o aumentar los sectores de riego lo que implica reducir el tamaño de la bomba. La última opción es maximizar la generación del sistema fotovoltaico a través de un sistema de seguimiento (tracking), esta opción presenta una mayor inversión por potencia instalada que un sistema fijo, que para un mismo sistema de riego puede ser un 50% mayor [30] y además presenta mayores costos de mantenimiento. Luego un diseño adecuado del sistema de tracking debe apuntar a reducir los costos de mantenimiento y aumentar la vida útil del sistema al menos a 20 años.

## 4.2. Resultados del dimensionamiento Zona sur.

En la Región del Maule, con una radiación promedio anual de 1900 [kWh/m<sup>2</sup>], se evalúan dos sistemas fotovoltaicos. El sistema on-grid de 2,5 [ha] y el sistema aislado de 0,5[ha], la condición geomorfológica para ambos proyectos se considera similar en cuanto a demanda hídrica del cultivo, frutilla. La red eléctrica local está presente en el lugar.

El análisis en este último caso es breve pues a pesar que los cultivos son diferentes a la zona norte, los resultados permiten extraer conclusiones comunes, además la metodología de análisis es similar. La principal diferencia radica en la menor demanda hídrica de estos, debido a una menor evapotranspiración, mayores precipitaciones y además un menor porcentaje de cobertura.

El sistema de riego conectado a la red (UDE 3) abastece diariamente 112 [m<sup>3</sup>/día] a una presión de trabajo de 47 [m.c.a], lo que genera una demanda energética de 14,51 [kWh/día] en el mes de máxima demanda y 1551,1 [kWh/año].

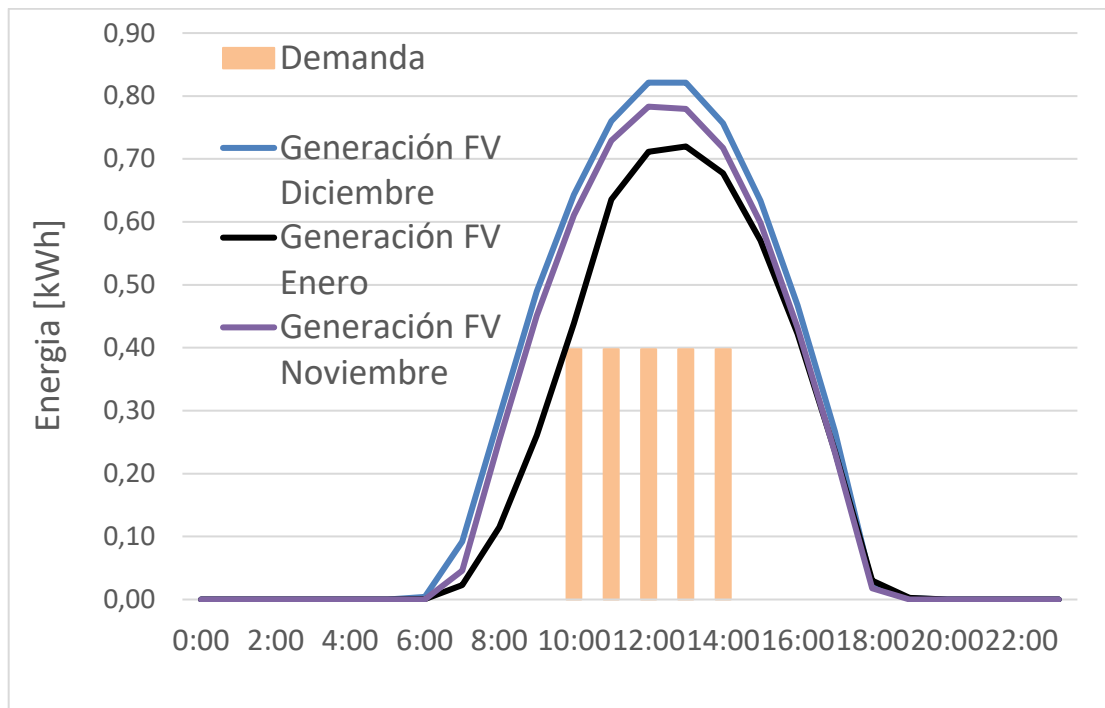


**Gráfico 4. Simulación gestión energética anual del sistema conectado a la red, en la zona sur.**

La gestión energética anual permite un autoconsumo de un 19%, a pesar del bajo porcentaje, la valorización de las inyecciones permite un sistema libre de pagos a la

compañía eléctrica y que sin la utilización de este sistema significaría un costo estimado anual de \$185.849.

Para el sistema aislado de la red, se establece que con una potencia FV instalada de 920 [Wp], la gestión energética diaria del riego fotovoltaico aislado (off grid), un campo fotovoltaico de 0,92 [kWp] logra generar la energía eléctrica óptima para la condición más crítica de la temporada de riego, esta se ubica a primera hora del día promedio del mes de máxima demanda de riego, de 10 a 11 horas. Donde se producen 643 [Wh] del día promedio del mes de diciembre, lo que cubre la demanda energética del riego en el mes de máxima demanda y toda su temporada anual.



**Gráfico 5. Gestión energética diaria (hora local) del riego solar directo aislado, del UDE 4.**

La generación del sistema se mantiene como base del consumo energético logrando un 33% de autoconsumo en un día de riego promedio en el mes de diciembre. Sin embargo, del total de la producción anual estimada para el sistema, considerando que solo en los meses en que hay riego se utilizará el sistema, se logra un autoconsumo de un 12%.

La clave en los días de riego es la gestión de los consumos eléctricos, controlando el encendido de las cargas eléctricas, como bombas de riego, en horas de máxima producción solar, haciendo que el usuario maximice el autoconsumo energético y evite generar excedentes solares (mayor producción solar que consumo). Esto es válido tanto para sistemas aislados como conectados a red.

En la tabla 15 se muestra un resumen de los resultados, donde el autoconsumo diario se considera en el mes de máxima demanda.

**Tabla 14. Comparación entre los distintos sistemas analizados.**

	<b>UDE 1</b>	<b>UDE 2</b>	<b>UDE 3</b>	<b>UDE 4</b>
<b>Potencia instalada [kWp]</b>	460	2070	1111	920
<b>Energía Generada [kWh/año]</b>	862,0	2157,6	2107,4	1404,9
<b>Energía autoconsumida Diaria [%]</b>	92%	50%	89%	33%
<b>Energía autoconsumida Anual [%]</b>	33%	16%	19%	12%
<b>Energía consumida de la red [kWh/año]</b>	282,8	0	-	0
<b>Pago por energía consumida [\$/año]</b>	0	0	0	0
<b>Ahorro [\$/año]</b>	63.862	81.837	185.849	37.170



## CONCLUSIONES

El trabajo realizado, cumple el objetivo general de contar con una herramienta de apoyo para la evaluación de proyectos solares aplicados a riego. La plataforma computacional desarrollada funciona como un simulador, donde se prueban los sistemas conectados y aislados de la red con las combinaciones posibles entre los datos que ingrese el usuario más las bases de datos disponibles. El modelo es capaz de entregar una evaluación de la prefactibilidad técnica para instalar sistemas fotovoltaicos en un sistema de riego tecnificado, con el fin de poder generar la energía requerida por las bombas hidráulicas, y así evitar el uso de energías no renovables y contaminantes.

El modelo numérico incluye variables hidráulicas, eléctricas y meteorológicas en el proceso de Simulación, en el cual se determina la factibilidad energética; y, para la Evaluación Económica, distintas variables para así entregar un indicador que sugiera una determinada prefactibilidad, como el ahorro, inyecciones y energía consumida desde la red. Los resultados entregados permiten al usuario tomar una decisión sobre la potencia fotovoltaica a instalar teniendo en cuenta los dos modelos desarrollados.

Se observa una dificultad está en la determinación de la demanda energética del riego, por lo que en eso ámbito se pone énfasis en este trabajo. Pues existe una amplia oferta de herramientas para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en el mercado. La determinación de un parámetro adecuado de caudal y presión de trabajo tienen relación con el diseño del sistema de riego. Este en los casos analizados es relativamente simple pues son sistemas de un solo sector de riego y punto de operación.

Sin embargo, esta plataforma presenta algunas restricciones en su operación, esto se describe a continuación.

Para sistemas más complejos, se recomienda la utilización de softwares de diseño adecuados para un dimensionamiento del sistema de riego y la determinación de los caudales y presiones de trabajo. Luego de esto, se puede utilizar el modelo de demanda hídrica desarrollado para luego realizar la determinación de la demanda energética.

Con la herramienta también es posible, realizando las modificaciones necesarias evaluar sistemas fotovoltaicos con acumulación (de energía o agua) que permitan aumentar el tiempo disponible (autonomía) de los sistemas aislados de la red, de manera económica. También se pueden considerar opciones de tracking.

Se presentan criterios para dimensionar los sistemas FV para el riego. El sistema off-grid se dimensionó según la demanda de energía FV en el mes de máxima demanda y el sistema conectado a la red según la demanda de energía FV anual. La principal diferencia entre estos dos criterios es que el sistema aislado FV tiene que producir la potencia necesaria para satisfacer la demanda hídrica y presión del sistema, en cambio el sistema on-grid se dimensiona para satisfacer los costos energéticos de la temporada de riego. Por lo cual el sistema aislado es mucho más robusto y tiene muchos excedentes energéticos que se pierden debido al sobredimensionamiento.

Considerando el modelo de demanda hídrica, la presión de trabajo y el modelo fotovoltaico y los criterios de dimensionamiento, se analizan 4 sistemas pilotos dos ubicados en la zona norte (Vallenar) y dos en la zona sur (Cauquenes) en ambos casos se evalúa un sistema conectado a la red y otro aislado de la red.

Los resultados de los sistemas pilotos indican que el sistema on-grid de la zona norte cubre el 100% de la demanda energética anual para el riego con una potencia instalada 4,5 veces menor que el sistema off-grid, lo que significa un costo de equipamiento casi 6 veces menor para sistemas de similares condiciones. Para los sistemas de la zona sur a pesar de que el área cultivada del caso conectado a la red es 8,3 veces mayor y la presión de trabajo es 3,5 mayor a la del sistema off-grid, la potencia fotovoltaica dimensionada es solo 1,5 veces mayor. De esta forma, el sistema on-grid minimiza la potencia a instalar para un mismo predio, lo que significa un mejor uso de suelo cultivable y una menor inversión.

La alta cobertura de la red eléctrica en el país y una normativa que permite valorizar las inyecciones a la red, nos obliga a considerar los sistemas conectados a la red como una alternativa viable desde el punto de vista técnico y económico, pues estos sistemas se dimensionan en base a la demanda anual y en este caso aplicado a pequeños

agricultores se logra una reducción del 100% de los costos energéticos anuales, se evita el sobredimensionamiento y altos costos de inversión como en los sistemas off-grid, logrando un ahorro en la inversión inicial y durante el funcionamiento del sistema lo que significa una mayor rentabilidad y disminución en el periodo de retorno de la inversión. Si se logra un autoconsumo del 100% de la energía solar, contando que cada kWh tiene un valor igual al precio de la electricidad dejada de comprar a la compañía eléctrica, se lograra reducir el periodo de retorno de la inversión inicial. Pero sí sólo se autoconsume el 50% de la producción, el excedente de energía inyectado a la red, tendrá  $\frac{1}{2}$  del valor, consecuentemente demoraremos más años en recuperar la inversión. De acuerdo a esto se debe realizar una gestión energética diaria del sistema fotovoltaico para vincular al riego, otras cargas eléctricas que utilicen la energía solar fuera de la temporada de riego o cuando la bomba está detenida, como sistemas de agua caliente, cámaras de frio, invernaderos, etc. Con el objetivo de utilizar el 100% de la energía solar en autoconsumo, esto es fundamental garantizar un menor periodo de retorno de la inversión. Se debe considerar que integrar un sistema fotovoltaico a la red eléctrica de una casa o predio, implica costos adicionales que deben ser valorados para la normalización del circuito eléctrico convencional, en conformidad a la normativa vigente.

Las principales causas de un sistema de riego tecnificado con altos costos de funcionamiento, se debe a que este satisface la demanda energética de un riego que excede las necesidades fisiológicas del cultivo o que por falta de mantención o un diseño deficiente trabaja en rangos excesivos de presión y caudal. Por esta razón, el dimensionamiento se debe basar en un sistema bien dimensionado de acuerdo a la demanda del cultivo, nunca en los actuales parámetros (potencia y caudal). Por eso que se establecen medidas de eficiencia energética con el fin de tener sistemas acordes a la cantidad de agua y presión necesaria. Utilizando bombas hidráulicas más ajustadas, diámetros de cañerías correctos, mediciones de caudal y presión se puede tener ahorros energéticos. Una vez aplicadas estas medidas de EE, se tiene un sistema hidráulico acorde a lo requerido, se debe proceder a dimensionar el sistema energético solar FV para abastecer el riego. Luego de aplicadas las medidas de eficiencia energética se

logran ahorros en el gasto energético mayores al 70% respecto a la condición inicial, que corresponde al pago que realizan los agricultores a la compañía de electricidad.

En ese sentido, es poco rentable dimensionar un gran sistema FV, con el propósito de reducir el consumo energético del riego para después darse cuenta que es más económico, regar lo necesario. Luego la eficiencia y el ahorro energético son las principales herramientas para lograr competitividad en el sector agrícola nacional y deben aplicarse como medida anterior al reemplazo de fuentes energéticas convencionales, como la red eléctrica local, o fuentes fósiles por renovables.

La recomendación general es instalar sistemas conectados a la red, pues la potencia a instalar será menor, dado que los criterios de dimensionamiento indican que este debe satisfacer la demanda anual del cultivo y no la potencia necesaria a al inicio del riego. De acuerdo a lo anterior, el sistema off-grid debe ser una solución cuando no sea posible conectarse a la red.

El tamaño del predio no tiene una relación directa con el tamaño del sistema fotovoltaico. Es decir, una misma extensión puede tener distintos puntos de operación y por ende distinta demanda energética de acuerdo a las condiciones climáticas, tiempo disponible para el riego, precipitaciones, etc.

Un sistema de riego solar requiere una alta inversión inicial, sin embargo, estos sistemas no deben observarse como una inversión de corto plazo, sino como una forma de energía competitiva para el riego a largo plazo. Los modelos de negocio se evalúan para una vida útil de 25 años, para lo que significa altas rentabilidades. Por lo tanto, es clave asegurar la fiabilidad de los sistemas durante al menos ese tiempo.

Es necesario promover modelos energéticos y de negocio más competitivos en el sector agroindustrial que atraigan a las pequeñas y medianas empresas para participar en el sistema energético de Chile, y a las entidades gubernamentales para que apunten sus prioridades normativas, legislativas y presupuestarias a favor de las pequeñas instalaciones asociativas basadas en energías renovables. Para ello los incentivos

gubernamentales para fomentar el uso de la energía solar fotovoltaica son fundamentales para la decisión de inversión.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOP, “Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2025”, p. 40, 2012.
- [2] A. Schüttler, “Escasez hídrica: oportunidades y desafíos para el país.”, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2017/03/22/escasez-hidrica-oportunidades-y-desafios-para-el-pais/>. [Accedido: 16-ago-2017].
- [3] J. Corominas, “Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad”, *Ing. del Agua, Vol. 17, No 3*, vol. 17, n° 3, pp. 219–233, 2010.
- [4] N. Argaw, R. Foster, y a Ellis, “Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Areas”, n° July, 2003.
- [5] F. Cuadros, F. López-rodríguez, A. Marcos, F. Moral, y I. Silos, “Cálculo informatizado de instalaciones solares fotovoltaicas (fotorriego), para riego de un olivar.”, en *Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 2005, pp. 112–122.
- [6] G. Arancibia, “Sistema de riego alimentado con energía solar fotovoltaica , desarrollado bajo dos modelos energéticos : aislado ( off- grid ) y autoconsumo ( on-grid )””, 2015.
- [7] Z. Glasnovic y J. Margeta, “A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems”, *Sol. Energy*, vol. 81, n° 7, pp. 904–916, 2007.
- [8] P. E. Campana, H. Li, y J. Yan, “Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand”, *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 635–645, 2013.
- [9] R. Muñoz, “Caracterización hidráulica de cuatro marcas de emisores para riego localizado comercializados en Chile”, Universidad de Talca, 2004.
- [10] R. Adonis y G. Arancibia, *Manual Eficiencia energética y energías renovables en el sector fruta fresca*. Santiago, Chile, 2015.
- [11] J. Doorenbos y W. O. Pruitt, *Guidelines for predicting crop water requirements*, vol. 24. FAO Irrigation and Drainage Paper, 1977.
- [12] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith, “Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, 2006.

- [13] CNR, “Boletín N° 6: Coeficiente de Cultivo”, 2010.
- [14] CNR, “Boletín N° 2: Programación de riego usando Estaciones Meteorológicas Automáticas”, 2010.
- [15] B. McMullen, “Chapter D9. Irrigation scheduling”, en *SOILpak for vegetable growers NSW Agriculture*, 2000, p. D9.1-D9.10.
- [16] H. Uribe y I. Maldonado, “Programación de riego”.
- [17] Servicios Integrados en Información Geográfica S.A. - SIIGSA, “Sistema de Información Integral de Riego - ESIIR”, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://esiir.cnr.gob.cl/>. [Accedido: 29-ago-2017].
- [18] P. Undunruaga y S. Bargas, “Manual de frutilla”, pp. 26–29, 2013.
- [19] SIAR, “Eficiencia energética en instalaciones de riego.”, 2009.
- [20] R. Abadia, C. Rocamora, y J. Vera, “Energy efficiency in irrigation distribution networks II: Applications”, *Biosyst. Eng.*, vol. 111, n° 4, pp. 398–411, 2012.
- [21] “EXPLORERADOR SOLAR”. [En línea]. Disponible en: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>.
- [22] W. De Soto, S. A. Klein, y W. A. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance”, *Sol. Energy*, vol. 80, n° 1, pp. 78–88, 2006.
- [23] D. L. King, W. E. Boyson, y J. A. Kratochvil, “Photovoltaic array performance model”, *Sandia Rep. No. 2004-3535*, vol. 8, n° December, pp. 1–19, 2004.
- [24] A. P. Dobos, “PVWatts Version 5 Manual (NREL/TP-6A20-62641)”, *Natl. Renew. Energy Lab.*, n° September, p. 20, 2014.
- [25] S. A. Klein y G. Nellis, “EES, Engineering Equation Solver”, *F-Chart Software, Box*. 2017.
- [26] G. Selles, E. Ferreyra, C. Aspillaga, y C. Zuñiga, “Requerimientos de Riego en Uva de Mesa: Experiencias en el valle de Aconcagua”, *Bol. INIA*, vol. 242, p. 80, 2012.
- [27] L. O. Odhiambo, W. L. Kranz, y D. E. Eisenhauer, “Irrigation Efficiency and Uniformity, and Crop Water Use Efficiency”, *Univ. Nebraska*, p. 8, 2011.
- [28] G. W. Ascough y G. a Kiker, “The effect of irrigation uniformity on irrigation water requirements”, *WaterSA*, vol. 28, n° 2, pp. 235–242, 2002.
- [29] M. A. Abella, E. Lorenzo, y F. Chenlo, “PV water pumping systems based on standard frequency converters”, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 11, n° 3,

pp. 179–191, 2003.

- [30] P. E. Campana, H. Li, J. Yan, A. Marcos, y F. Moral, “Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand”, *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 112–122, 2013.
- [31] J. Vergara, R. Fuster, A. León, y P. León, “Manejo del riego en condiciones de sequía”, *Comicion Nac. Riego*, pp. 1–74, 2011.
- [32] R. S. Ayers y D. W. Westcot, *Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1*, vol. No.29. 1985.
- [33] A. Antúnez, J. P. Martínez, E. Carvallo, y J. Otárola, “Manejo del riego para mitigar el impacto de la salinidad en cultivos”, *Informativo INIA-URURI*, 2011.
- [34] R. Ferreyra E., G. Sellés van Sch., y A. Pimstein A., “Diseño, Manejo y Mantencion de equipos de riego localizado de alta frecuencia”, *Bol. INIA*, n° 35, pp. 1–55, 2001.
- [35] J. C. C. Saad y J. A. Frizzone, “Design and Management Optimization of Trickle Irrigation Systems using Non-linear Programming”, pp. 109–118, 1996.

## ANEXOS

### ANEXO 1: PROGRAMACIÓN DEL RIEGO.

La programación del riego es una metodología que consiste en establecer la frecuencia y tiempo de riego de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas del predio. Una apropiada programación del riego permite optimizar el uso del agua y maximizar la producción y calidad de los productos. Se requiere especial atención en períodos críticos de sequía, por esta razón la metodología utilizada para la determinación de la demanda hídrica está basada en el manual de manejo del riego en condiciones de sequía [31].

El volumen de agua entregado en cada riego por los emisores  $N_e$  que tienen un caudal nominal de  $q_e [lt/h]$  en un tiempo de riego diario  $T_R [h]$  debe ser igual a la demanda hídrica dada por el producto de demanda bruta diaria  $DB [lt/dia]$  con la frecuencia de riego o intervalo entre riegos  $I$  para cada mes (también se puede usar la relación  $DB/D_r$  con  $DB$  en  $lt/mes$  y  $D_r$  el número de riegos al mes). De acuerdo a lo anterior se tiene la siguiente relación:

$$N_e \cdot q_e \cdot T_R = DB \cdot I \quad (39)$$

Se tiene una ecuación con dos incógnitas, intervalo y tiempo, en donde hay que fijar una de ellas. En suelo de textura arenosa, en donde se originan bulbos húmedos estrechos y profundos, se tiende a intervalos muy cortos (uno o dos riegos diarios), tiempos breves y número elevado de emisores. En suelos de textura arcillosa se tiende a intervalos más largos (tres o cuatro días por semana), tiempos de riego más amplios y menor número de emisores. En suelos de textura franca se suele regar una vez por día.

Lo usual es elegir un periodo entre riegos  $I$  que se puede deducir desde los parámetros físicos del suelo y el clima.



## Frecuencia de riego

La frecuencia de riego,  $I$ , permite estimar el número de días transcurridos entre dos riegos consecutivos. Se puede estimar de la siguiente forma.

$$I = \frac{LN}{ET_m} [\text{días}] \quad (40)$$

Donde,

$I$  = frecuencia de riego (días).

$LN$  = Lamina neta de agua a reponer (mm).

$E_{tm}$  = evapotranspiración máxima (mm/día).

En riegos de alta frecuencia, esto no se cumple, pues el agua se aplica diariamente o con una frecuencia fija.

## Lamina neta de agua.

La lámina neta se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$LN = \frac{AD \times Ur}{100} \quad (41)$$

Donde:

$LN$  = Lamina neta [mm]

$AD$  = Agua disponible [mm]

$Ur$  = Umbral de riego [%]

Aproximadamente un 33% del agua disponible es extraída por la planta con facilidad, a medida que se va secando el suelo es más difícil para éstas absorber agua por lo que se debe regar antes que el contenido de agua llegue al punto de marchitez permanente (PMP), de esta forma se fija un umbral de riego que es un porcentaje del agua disponible que tiene que consumirse antes de realizar un riego.

El agua disponible se determina a través de la siguiente ecuación.

$$AD = \frac{(CC - PMP) \cdot Da \cdot H \cdot (1 - P) \cdot PSM}{10} \quad (42)$$

Dónde:

*AD* = Agua disponible [mm].

*CC* = Capacidad de campo (%Pw).

*PMP* = Punto de marchitez permanente (%Pw).

*Da* = Densidad aparente gr/cm.

*H* = Profundidad del perfil donde crecen las raíces [mm].

*P* = Fracción de piedras presentes en el perfil de suelo [%].

*PSM* Fracción de suelo mojado por emisores (riego por goteo o microaspersión).

Los valores de *CC*, *PMP* y *Da* se obtienen del análisis de laboratorio a muestras de suelo, en cambio *H*, *P* y *PSM* se pueden obtener a través de la apreciación visual de calicatas. Las calicatas son excavaciones de aproximadamente 2 metros de profundidad, 80 cm de ancho y unos 1.5 metros de longitud. El observador al ingresar a la calicata puede determinar el número y espesor de las capas del perfil, el porcentaje de piedras y el crecimiento de las raíces, entre otros parámetros.

## **ANEXO 2. COEFICIENTES DE CORRECCIÓN.**

Los métodos de riego localizados, como es el caso del método riego por goteo, se utilizan normalmente para vides, frutales y cultivos en hileras, donde los cultivos cubren una parte de la superficie de suelo con su follaje. La cubierta vegetal varía durante la etapa de desarrollo de huerto o vides interceptando una porción de la radiación solar. Cuando una superficie no sombreada por el follaje es mojada a través del riego por goteo, una porción del beneficio potencial del agua aplicada se pierde como evaporación directa desde el suelo o por la transpiración de las malezas. Por lo tanto, el requerimiento hídrico de los cultivos determinado por métodos convencionales

debe incluir las correcciones de cobertura de la evapotranspiración. Para este objetivo es necesario definir tres conceptos claves, que corresponden a:

- **Área unitaria, Au (m<sup>2</sup>):** área teórica que tiene cada frutal según el marco de plantación. Corresponde a la superficie determinada por la multiplicación de las distancias entre hileras por la distancia entre plantas.
- **Área de cobertura, Ac (m<sup>2</sup>):** superficie de sombreado que el árbol abarca en un momento dado. Para la programación del riego en frutales este valor debe modificarse en función del follaje, es decir, para las diferentes estaciones del año (primavera, verano, otoño).
- **Porcentaje de sombreado (Ps):** corresponde a la relación entre el área de cobertura y el área unitaria, es decir, los factores anteriores. El porcentaje obtenido se debe corregir por medio de la tabla de donde se obtiene el Kr. La idea central de este parámetro es que no debe mojarse todo el marco de plantación para asegurar el riego de una especie frutal. Por esta razón se disminuye la tasa de riego aplicando un factor que siempre será menor o igual a 1.

$$Ps = 100 \frac{A_U}{A_C} \quad (43)$$

*Tabla 15. Coeficiente de cobertura para distintos porcentajes de sombreado.*

<b>Porcentaje de sombreado (Ps)</b>	<b>K<sub>r</sub> [%]</b>
10	12
20	24
30	35
40	47
50	59
60	70
70	82
80	94
90	100
100	100

Fuente 1: J. Vergara, R. Fuster, A. León, y P. León, "Manejo del riego en condiciones de sequía", *Comicion Nac. Riego*, pp. 1-74, 2011.

### **Coefficiente de lavado de sales.**

Los requerimientos de lavado corresponden a la cantidad de agua mínima de percolación para mantener la salinidad del suelo a un nivel no perjudicial para el desarrollo de las plantas. Se determina mediante la siguiente ecuación.

$$RL = \frac{CE_e}{5 CE_e - CE_w} \quad (44)$$

Donde  $CE_w$  es la conductividad eléctrica del agua de riego y  $CE_e$  es la conductividad eléctrica del extracto saturado de la solución suelo [32]. La unidad de medida de la conductividad eléctrica es decisiemens por metro, dS/m.

El agua debe ser libre de sales (con una conductividad eléctrica (CE) inferior a 0,8 [dS/m], para permitir una alta producción y evitar problemas con sodio, calcio, boro o cloruros que pueden producir graves daños en el desarrollo del cultivo [18].

La conductividad del extracto saturado se mide después de tomar una porción de la muestra de suelo que se mezcla con agua destilada hasta formar una pasta saturada, con el objetivo de extraer sales solubles mediante una filtración [33]. Los suelos se clasifican de acuerdo a la conductividad eléctrico en 5 niveles, como se indican en la Tabla 16.

*Tabla 16. Clasificación de suelos según grado de salinidad.*

<b>Clasificación</b>	<b>Grado de Salinidad</b>	<b>C.E [dS/m]</b>	<b>Efecto en los cultivos</b>
A	Bajo	<2	Ningún efecto
B	Leve	2 a 4	Leve

C	Alto	4 a 8	Disminución del rendimiento
D	Muy alto	8 a 16	Pocos cultivos soportan estas condiciones
E	Extremadamente alto	> 16	Mayores restricciones que el caso anterior

*Fuente: A. Antúnez, J. P. Martínez, E. Carvallo, y J. Otárola, "Manejo del riego para mitigar el impacto de la salinidad en cultivos", Informativo INIA-URURI, 2011.*

### ANEXO 3. DISEÑO HIDRÁULICO, PERDIDA DE CARGA.

#### Presión de trabajo sistema de riego.

Lo que se busca en este ítem es determinar una presión o altura adecuada de trabajo del sistema (altura de bombeo) utilizando medidas de **eficiencia energética** como por ejemplo, **reduciendo la presión de trabajo del riego**, usando emisores de menor presión de trabajo, o disminuyendo las pérdidas de carga en redes hidráulicas, incrementando los diámetros de tubería, o usando filtros que trabajan con menores presiones.

#### Perdidas de carga en tuberías.

Las pérdidas por rozamiento en las tuberías se calculan mediante la fórmula 8 llamada ecuación de Darcy - Weisbach.

$$h_T = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \text{ [m. c. a]} \quad (45)$$

La pérdida de carga por unidad de longitud de tubería será:

$$J = \frac{h_T}{L} = \frac{f}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \left[ \frac{\text{m. c. a}}{\text{m}_{\text{tubería}}} \right] \quad (46)$$

Donde,

$D$  = diámetro interno de la tubería [m]

$v$  = velocidad del fluido [m/s]

$g$  = gravedad = 9,80665 [m/s<sup>2</sup>]

$f$  = factor de fricción [-]

La ecuación de Darcy - Weisbach puede ponerse en función del caudal circulante, ya que el caudal que fluye por una conducción circular a plena sección está ligado al diámetro y a la velocidad media: Luego la pérdida de carga por unidad de longitud será:

$$J = f \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad (47)$$

Sustituyendo en la ecuación de Darcy – Weisbach la pérdida de carga está dada por:

$$h_T = J \cdot L \quad (48)$$

### **Factor de fricción.**

El cálculo del factor de fricción es donde radica la complejidad del método, ya que se emplean las ecuaciones implícitas de Colebrook – White. En EES se obtiene el factor de fricción de Darcy ( $f$ ) para el flujo interno dado las entradas del número de Reynolds ( $Re$ ) y la rugosidad relativa ( $\varepsilon/D$ ) con la función MoodyChart se calcula el factor de fricción del tubo usando la relación de Churchill [34].

### **Perdida de carga localizadas.**

Las pérdidas de carga localizadas son pérdidas de carga en elementos singulares de la tubería tales como codos, estrechamientos, válvulas, etc. y que se deben a fenómenos de turbulencia. Estas pérdidas se determinan con la siguiente relación.

$$h_s = K \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4} \quad (49)$$

La suma de estas pérdidas de carga localizadas más las pérdidas por rozamiento dan las pérdidas de carga totales.

*Tabla 17 Pérdida de carga producida por elementos del cabezal de riego.*

<b>Elemento del cabezal</b>	<b>Pérdida de carga (m)</b>
Hidrociclóna	3-5
Filtro de arena	3-5
Filtro de malla	1-3
Filtro anillas	1-3
Tanque de fertilización	1-4
Inyector hidráulico	4-5
Inyector venturi	5-20
Regulador de presión	4-6
Válvula	1-3

*Fuente: Salas, A. F., Salas, A. F., Urrestarazu, L. P. (2008, August 05). tutorial\_20. Retrieved November 13, 2017, from ocvus Web site: [http://ocvus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%2010.Riego%20goteo/tutorial\\_20.htm](http://ocvus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%2010.Riego%20goteo/tutorial_20.htm).*

### **Coefficiente de Uniformidad y Criterio de la Sub Unidad.**

Los emisores de riego localizado se caracterizan con una ecuación o curvas que relacionan el caudal con presión de trabajo de estos.

$$q = k \cdot h^x \quad (50)$$

Donde,

$q$  =caudal del emisor [lt/hr].

$x$  =exponente de descarga, del catálogo del emisor.

$k$  =coeficiente de descarga.

$h$  = presión hidráulica a la entrada del emisor [m].

El coeficiente de uniformidad (CU) es un indicador de que tan bien (o mal) se distribuye el agua en los emisores. Expresa la variación de caudales en los emisores debido a la diferencia de presiones, que a su vez depende de los desniveles topográficos y pérdidas de carga en la red de riego, el CU se determina como:

$CV$  = Coeficiente de variación de fabricación [-]

$e$  = Número de emisores de los que recibe agua una misma planta [-]

$q_{min}$  = Caudal mínimo permitido en el diseño [lt/hr]

$q_a$  = Caudal medio o nominal del emisor [lt/hr]

$CU$  = Coeficiente de uniformidad [-]

$$CU = \left( \frac{q_{min}}{q_a} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1,27 \cdot CV}{\sqrt{e}} \right) \quad (51)$$

En el diseño, la uniformidad es una condición que se impone. Se elige un CU y se debe mantener durante el diseño hidráulico. Cuanto mayor es su valor, más cara es la instalación. El CU se fija lo más cercano al potencial que tienen los sistemas de riego localizado que es de 90% [34]. De la ecuación 52 se obtiene el caudal mínimo ( $q_{min}$ ) en la subunidad, con este valor y sabiendo los parámetros del emisor se puede determinar la presión mínima en la subunidad de riego con la ecuación 16.

$$h_{min} = \left( \frac{q_{min}}{k} \right)^{\frac{1}{x}} [m. c. a] \quad (52)$$

De la misma forma se determina la presión media o de funcionamiento del emisor, en base al caudal nominal  $q_a$ .

$$h_a = \left( \frac{q_a}{k} \right)^{\frac{1}{x}} [m. c. a] \quad (53)$$



Luego la máxima variación de presiones permitida en la subunidad (incluye laterales de riego y tubería terciaria) para que los emisores trabajen con un 90% de uniformidad es:

$$\Delta H_S = 2,5 \cdot (h_a - h_{min}) \quad (54)$$

El reparto óptimo se define como la relación entre las pérdidas en los laterales y en el total de la subunidad. El valor de  $\Delta H_S$  debe dividirse entre las líneas lateral y múltiple. Keller y Bliesner recomendaron, como una directriz de diseño general, que las variaciones de la cabeza de subunidad admisibles deberían asignarse igualmente entre las variaciones de la presión lateral y del portalateral. Karmeli y Peri encontraron que la división más económica es aproximadamente el 55% en el lateral y el 45% en la tubería portalateral [35].

$$\Delta H_L = 0,55 \cdot \Delta H_S \quad (55)$$

$$\Delta H_T = 0,45 \cdot \Delta H_S \quad (56)$$

Luego los diámetros de las tuberías y componentes usados para calcular las diferencias de presión en los siguientes dos ítems se comparan con los admisibles de las ecuaciones 55 y 56, si se cumple con la condición esos componentes son aceptados.

En una instalación de riego los caudales no son los mismos en todos los emisores debido a las diferencias de presiones a que se encuentran sometidos que a su vez dependen de los desniveles topográficos y las pérdidas de carga en la red de riego. En una subunidad de riego rectangular y sin pendientes el esquema de presiones se describe en la siguiente figura.

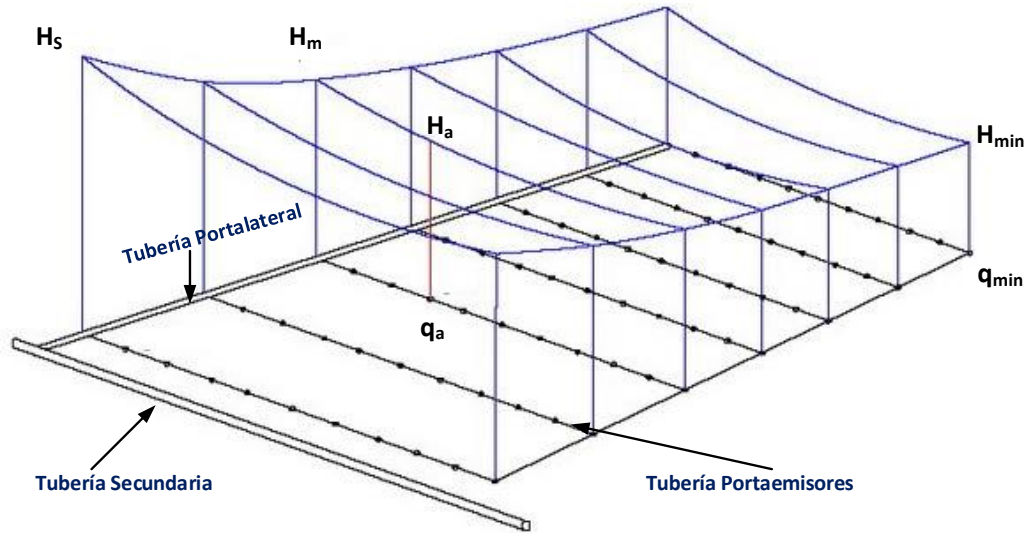


Figura 7. Distribución de presiones en el subsector de riego.

### Presión y caudal de trabajo en los laterales.

Para determinar la pérdida de carga de una tubería se necesita como parámetros de entrada, la rugosidad del material y el diámetro interno, caudal y largo de la tubería. Tanto la rugosidad como el diámetro interno se pueden obtener fácilmente de catálogos de los fabricantes. En general las tuberías laterales son de polietileno de baja densidad, PEBD. El caudal de una tubería lateral se determina sumando los caudales unitarios de cada emisor en base al caudal nominal, como se muestra en la ecuación 21.

$$Q_L = q_a \cdot N_{e,lateral} \left[ \frac{lt}{hr} \right] \quad (57)$$

Donde,

$q_a$  =caudal nominal del emisor[lt/hr].

$N_{e,lateral}$  =Nnúmero de emisores en el lateral crítico.

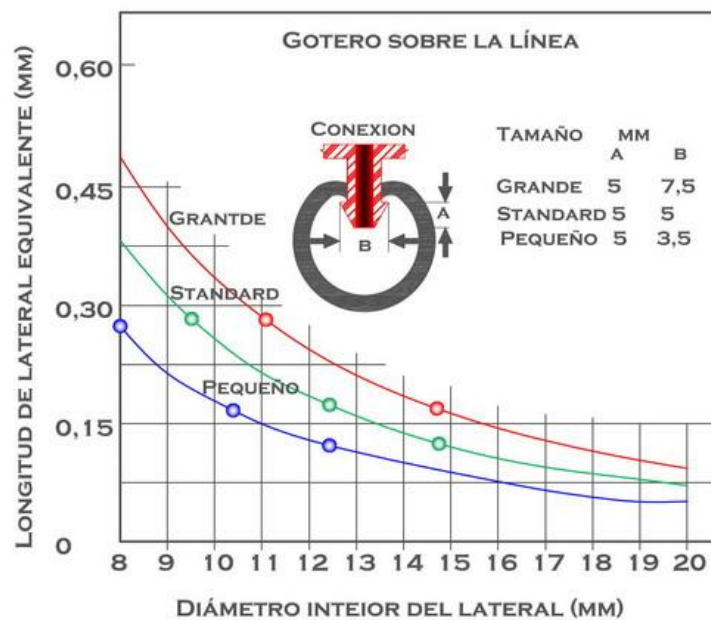
Al largo de la tubería se le realiza una corrección relacionada con la pérdida de carga singular provocada por la conexión de los emisores en la tubería, como se

muestra en la Figura 8. Este valor se denomina Longitud equivalente y se obtiene de catálogos si es posible, en otro caso se puede calcular en el caso de goteros insertos utilizando el grafico de la imagen x y la siguiente relación,

$$L_{eq} = N_{e,lateral} \cdot fe \quad (58)$$

$N_{e,lateral}$ =Número de emisores en el lateral

$fe$ =longitud equivalente de la conexión del emisor



**Figura 8. Grafico para determinar largo equivalente de la conexión del gotero en la tubería lateral.**

Luego la longitud total considerando el largo de la tubería y la equivalente se obtiene como.

$$L_{total} = L_{lat} + L_{eq} \quad (59)$$

Cuando el caudal va disminuyendo a lo largo de la tubería por efecto de las salidas múltiples, la pérdida de carga unitaria así mismo va decreciendo de manera que la pérdida de carga total no puede calcularse puramente usando la ecuación de darcy weisbach, siendo necesario la introducción de un coeficiente ( $F_r$ ) que dependa del

número de salidas para obtener una pérdida de carga real. El valor de  $F$  viene dado por la fórmula de Christiansen.

$$F = \frac{1}{1 + \beta} + \frac{1}{2 N_e} + \frac{\sqrt{\beta - 1}}{6 N_e^2} \quad (59)$$

La corrección introducida por Scaloppi indica que cuando los  $N_e$  emisores están espaciados a una cierta distancia  $S_e$ , y la distancia desde el comienzo de la tubería a la primera salida  $S_0$ , el factor de corrección por salidas múltiples se obtiene según la ecuación 60.

$$F_r = \frac{r + (N_e F) - 1}{r + N_e - 1} \quad (60)$$

$$r = \frac{S_0}{S_e} \quad (61)$$

Utilizando la ecuación 62 con las correcciones mencionadas se obtiene la pérdida de carga en el lateral de riego crítico como:

$$h_L = J \cdot L_{total} \cdot F_r \quad (62)$$

Con la pérdida de carga,  $h_L$ , conocida y la presión media o de funcionamiento,  $h_a$ , se puede calcular la presión en el inicio del lateral, donde se toman en cuenta 2 casos.

**a) Lateral horizontal o ascendente.**

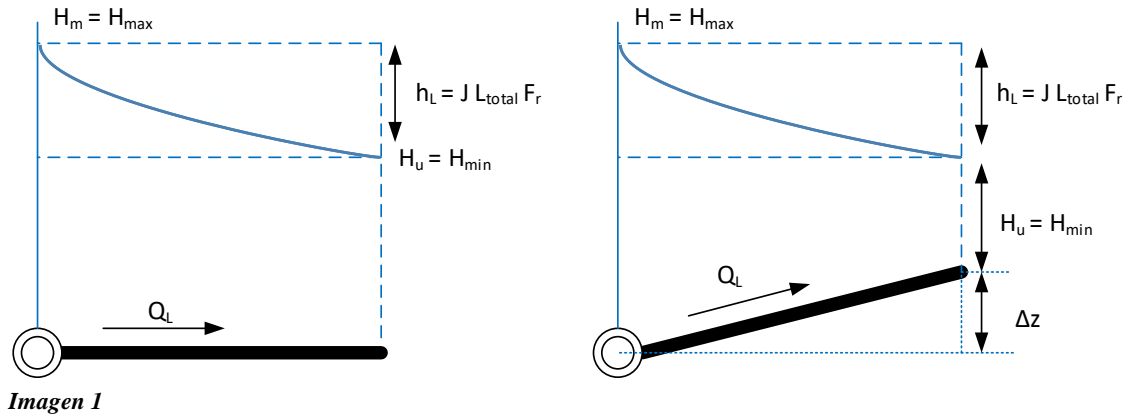


Imagen 1

En ambos casos, la presión máxima,  $H_{max}$  (m.c.a.), coincidirá con la presión en la entrada del lateral,  $H_m$ , la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$H_m = h_a + 0,75 \cdot h_L + 0,5 \cdot \Delta z \quad (63)$$

Siendo  $h_a$  (m.c.a.) la presión media y  $\Delta z$  el desnivel del terreno para el lateral de riego, que debe ser mayor que cero si el lateral es ascendente, en el caso de terrenos horizontales, su valor es cero.

En terrenos horizontales y ascendentes, la presión mínima,  $H_{min}$  (m.c.a.), coincidirá con la presión en el último emisor,  $H_u$  (m.c.a.), la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$H_u = H_m - h_L - \Delta z \quad (64)$$

Luego la diferencia de presión debe cumplir con la condición impuesta para el lateral de riego, con el fin de aceptar o rechazar una tubería de determinado diámetro.

$$H_m - H_u = \Delta H_L + \Delta z < \Delta H_L \quad (65)$$

### Lateral descendente.

En terrenos descendentes, si el valor de la pendiente  $i$  es mayor o igual a  $J$  [m.c.a / m], la presión mínima del lateral coincidirá con la presión de la entrada del lateral y

el valor maximo coincidirá con la presión en el ultimo emisor. En este caso se dice que la pendiente es fuerte

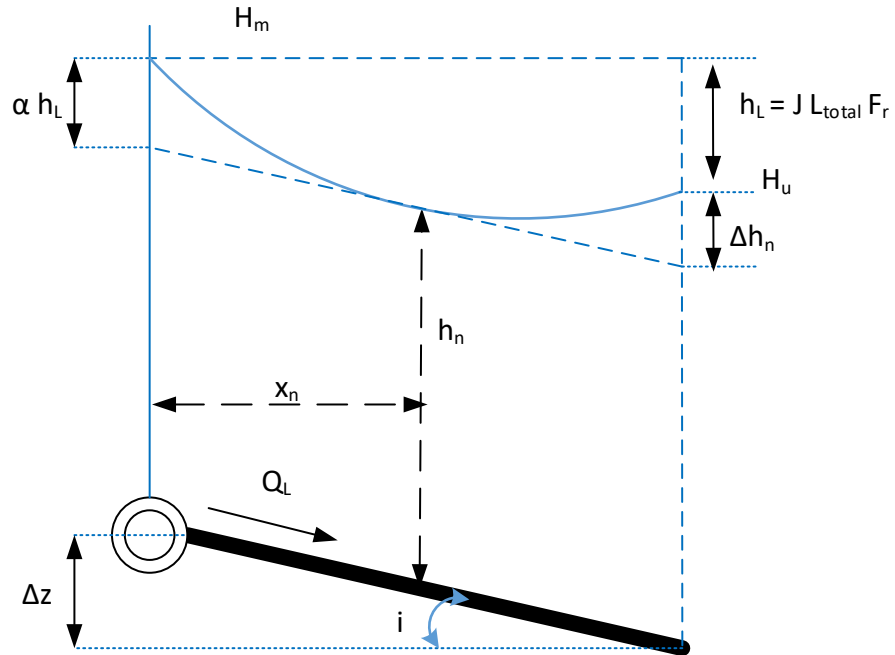


Imagen 2

Las presiones iniciales y finales estan definidas por:

$$H_m = h_a + 0,75 \cdot h_L - 0,5 \cdot \Delta z \quad (66)$$

$$H_u = H_m - h_L + \Delta z \quad (67)$$

Si el valor absoluto la pendiente  $i$  (m m-1) es menor que  $J^*$  (m.c.a. m-1), se dice que la pendiente es suave. En este caso el valor mínimo se determina del siguiente modo:

$$H_{min} = H_m - \alpha \cdot h_L \quad (68)$$

Donde el coeficiente  $\alpha$  es una función de  $F$  y del cociente  $z/h$ , determinado mediante la n:

$$\alpha = 1 + \frac{\Delta z}{h_L} + 0,357 \cdot \left(-\frac{\Delta z}{h_L}\right) \quad (69)$$

El valor máximo  $H_{max}$  corresponderá al valor más alto obtenido para  $H_m$  y  $H_u$ , determinados según las ecuaciones 5 y 6.

Los diámetros comerciales se consideran validos si la diferencia de presiones maxima es inferior a la tolerancia definida.

$$H_{max} - H_{min} < \Delta H_L \quad (70)$$

### **Perdidas de carga en tubería porta lateral o terciaria.**

Conceptualmente es similar al cálculo de la tubería lateral. Se determina una longitud equivalente relacionada a la conexión de la tubería lateral en la terciaria como,

$$L_{eq} = 0,10 \cdot Q_L^{0,3} \cdot N_{Lat}^{0,26} \quad (71)$$

El caudal en este caso corresponde a la suma de los caudales todos los emisores de riego de la subunidad.

$$Q_T = q_e \cdot N_e \left[ \frac{lt}{hr} \right] \quad (72)$$

La pérdida de carga en la tubería terciaria,  $h_T$ , se determina con la ecuación 62. Los diámetros comerciales evaluados deben cumplir con la siguiente condición:

$$h_T \pm \Delta z < \Delta H_T \quad (73)$$

### **Presión de trabajo de la Subunidad de riego.**

$$H_s = H_m + 0,75 \cdot h_T \pm 0,5 \cdot \Delta z \quad (74)$$

### **Diámetros de tubería primaria y secundaria.**

El dimensionamiento de estas tuberías, está determinado principalmente por la velocidad con la cual circula el agua por ellas. Para las tuberías de PVC, se recomienda que esta velocidad sea inferior a 1,5 m/s [34].

### **Altura total del subsistema de riego.**

La altura o carga en metros columna de agua, m.c.a, que debe suministrar la bomba al sistema debe vencer la fricción que produce el flujo del agua a través de las tuberías, las pérdidas de carga en singularidades (válvulas, codos, etc.), la diferencia de altura entre la fuente de agua y los emisores de riego y entregar la presión de trabajo necesaria para estos.

El cálculo de la presión de trabajo se realiza para el caso más desfavorable, por ejemplo si un turno consiste en regar por separado cada uno de los sectores, la presión del sistema corresponde a la del subsector más alejado si es que todos son iguales, como se muestra en la figura 7.



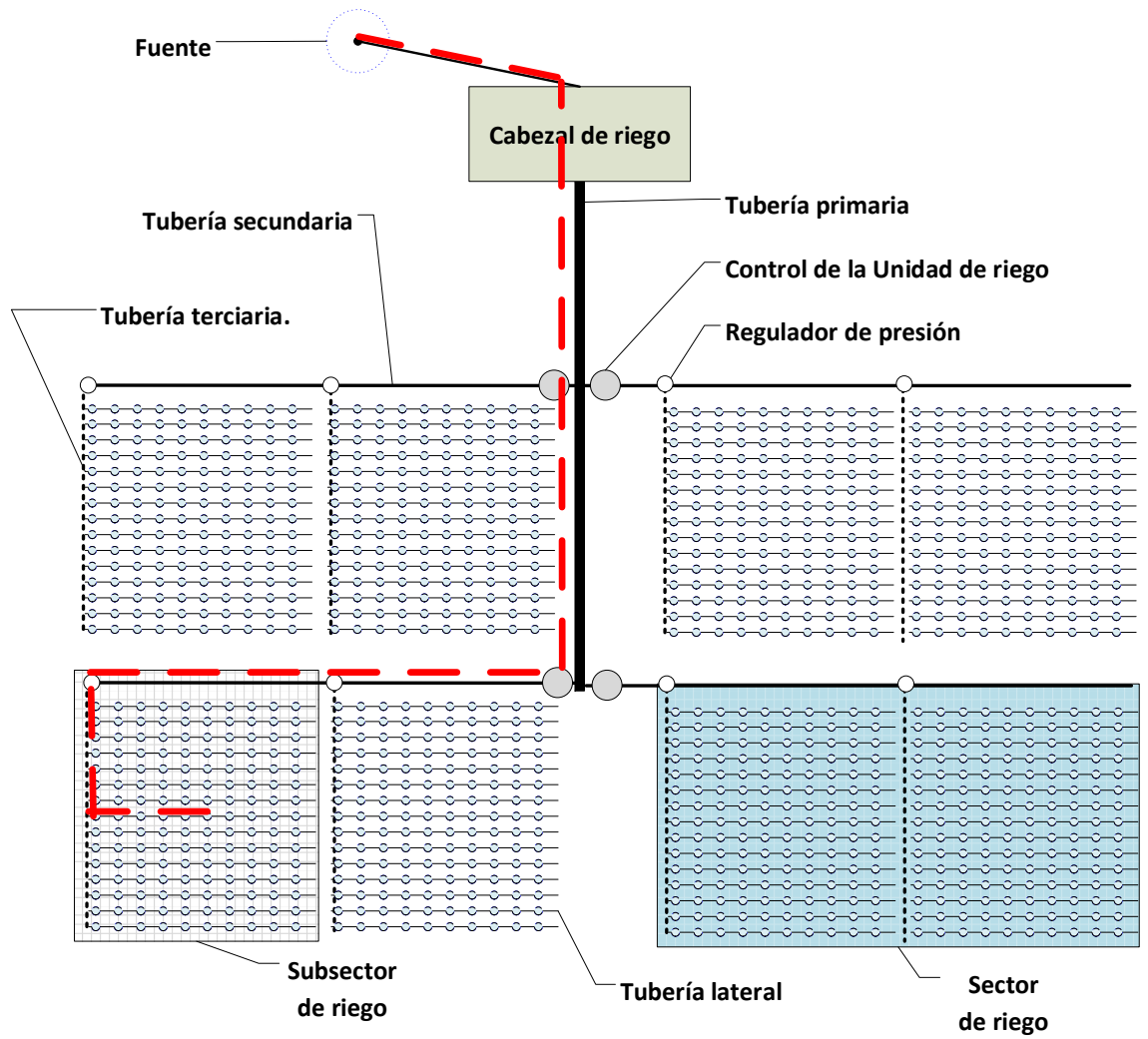


Figura 9.

## ANEXO 4. ÁNGULOS SOLARES.

### Tiempo solar aparente y hora solar

El tiempo solar aparente,  $TSA$ , es el tiempo usado en todas las relaciones de ángulo solar; No coincide con el tiempo local estándar (reloj local),  $TLE$ . Es necesario convertir el tiempo estándar en tiempo solar aplicando dos correcciones.

En primer lugar, hay una corrección constante de la diferencia de longitud entre el meridiano del observador ( $\lambda_L$ ) y el meridiano en el que se basa el tiempo estándar local,  $\lambda_S$ . Dicha corrección está dada por:

$$\Delta\lambda = \frac{4(\lambda_S - \lambda_L)}{60} \quad (75)$$

Donde,

$\lambda_S=15^\circ$  por cada huso horario (UTC-4 para Chile)

$\lambda_L$ =Longitud local

Esta corrección es constante para una longitud determinada, y la siguiente regla debe ser seguida con respecto a la convención de signo. Si la ubicación está al este del meridiano estándar (Greenwich), la corrección se agrega a la hora del reloj. Si la ubicación es oeste, se resta (caso de Chile).

La segunda corrección es a partir de la ecuación del tiempo,  $ET$ , que tiene en cuenta las perturbaciones en la tasa de rotación de la Tierra que afectan el tiempo que el sol cruza el meridiano del observador.

$$ET = \frac{9,87 \cdot \sin 2B - 7,58 \cdot \cos B - 1,5 \cdot \sin B}{60} \quad (76)$$

Donde,

$$B = (N - 1) \frac{360}{364} \quad (77)$$

*N = Día del año*

*Tabla 18. Día promedio utilizado para determinar ángulos solares y generación del sistema fotovoltaico.*

<b>Mes</b>	<b>Día</b>
Enero	17
Febrero	16
Marzo	16
Abril	15
Mayo	15
Junio	11
Julio	17
Agosto	16
Septiembre	15
Octubre	15
Noviembre	14
Diciembre	10

El tercer factor de corrección tiene relación con el horario de verano, en Chile el huso horario es UTC-4 (UTC -3 en verano) luego el factor DS (daylight saving time) igual a 1 cuando hay horario de verano y 0 en caso contrario.

Luego el tiempo solar aparente considerando las dos correcciones mencionadas se calcula como,

$$TSA = TLE + ET - \Delta\lambda - DS \quad (78)$$

### Ángulos solares

Las relaciones geométricas entre un plano en cualquier orientación con respecto a la tierra en cualquier momento y la radiación solar directa entrante, es decir, la posición del sol relativa a ese plano, Puede describirse en términos de varios ángulos. Los ángulos y un conjunto de convenciones de signos consistentes son los siguientes:

#### Declinación ( $\delta$ )

La declinación solar es la desviación angular de los rayos del sol con respecto al eje ecuatorial. Se considera positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur.

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) (0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B + 0.000907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B) \quad (79)$$

Donde,

$$B = (N - 1) \frac{360}{365} \quad (80)$$

Donde  $\delta$  y el ángulo  $B$  diario están en grados.

#### Hora solar ( $h$ )

La hora solar de un punto en la superficie de la Tierra es el ángulo que debería rotar la Tierra para traer al meridiano del lugar directamente bajo el sol (mediodía solar).

$$h = 15 \cdot (\text{TSA} - 12) \quad (81)$$

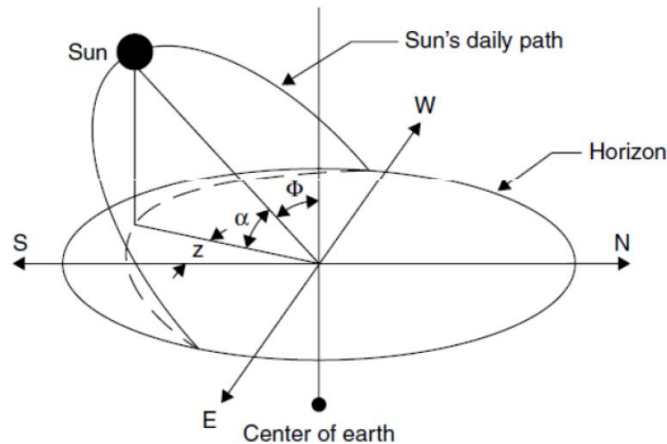


Figura 10. Descripción del modelo de ángulos solares utilizado.

### **Altitud solar $\alpha$ .**

La es el ángulo entre el rayo solar y un plano horizontal a la superficie terrestre. La altitud máxima ocurre al medio día solar, esto quiere decir que la hora solar (ángulo) es igual a  $0^\circ$ .

### **Zenit Solar $\Phi$ .**

Es el complemento de altitud solar. La ecuación x relaciona la altitud y zenit solar con la latitud (L), la declinación y la hora solar.

$$\sin \alpha = \cos \Phi = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h \quad (82)$$

### **Azimut solar z.**

El Azimut es el ángulo entre la proyección de los rayos del sol en el plano horizontal, con respecto a una referencia. En el hemisferio sur se mide con respecto al norte, y viceversa. Se define positivo hacia el oeste.

$$\sin z = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \alpha} \quad (83)$$

Esta ecuación es válida cuando,

$$\cos h > \frac{\tan \delta}{\tan L} \quad (84)$$

Si no, el sol traspasó la línea E-O y se debe recalcular:

$$\begin{aligned} z &= -180^\circ + |z| && \text{(mañana)} && (85) \\ z &= 180^\circ - z && \text{(tarde)} && (86) \end{aligned}$$

### Ángulos de superficie.

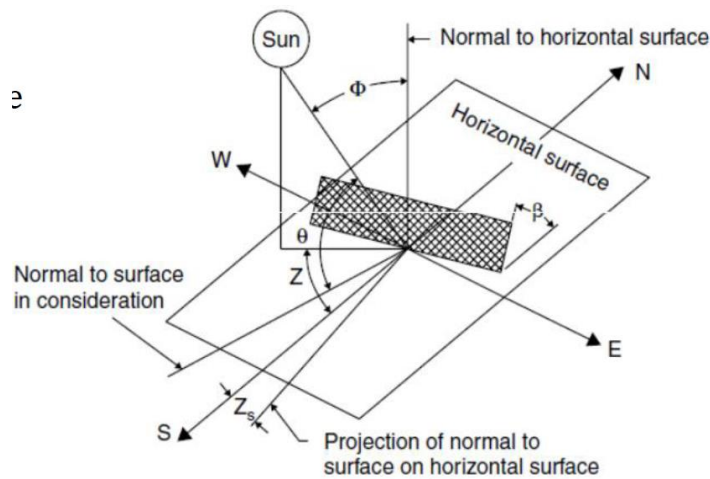


Figura 11. Ángulo de incidencia y ángulos de superficie para un panel fotovoltaico inclinado.

Hay un conjunto de relaciones útiles entre estos ángulos. Las ecuaciones que relacionan el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie,  $\theta$ , con los otros ángulos son:

- **Inclinación ( $\beta$ ):** Ángulo entre el plano de la superficie y el plano horizontal.
- **Azimet de superficie ( $Z_s$ ):** Ángulo entre la proyección horizontal de la normal de la superficie y la dirección sur. Es negativo al este y positivo al oeste;  $-180^\circ \leq Z_s \leq 180^\circ$ .
- **Incidencia ( $\theta$ ):** Ángulo entre los rayos solares y la normal a una superficie. Es el ángulo más importante para estimar el recurso solar. Se calcula en base a la información descrita anteriormente como.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin L \sin \delta \cos \beta - \sin \delta \cos L \sin \beta \cos z_s + \cos L \cos \delta \cos \beta \cos h \\ & + \cos \delta \sin L \sin \beta \cos h \cos z_s + \cos \delta \sin h \sin \beta \sin z_s \end{aligned} \quad (83)$$