



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO - CHILE

**“DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE
BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS PARA UN
VIÑEDO EN EL VALLE DE CASABLANCA”**

Juan Carlos Figueroa Fernández

**Memoria de Titulación para optar al título de
Ingeniero Electricista**

Profesores Guías: Sr. Pablo Lezana I.

Sr. Mohamed Abdelhamid

Septiembre 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO - CHILE

**“DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE
BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS PARA UN
VIÑEDO EN EL VALLE DE CASABLANCA”**

Juan Carlos Figueroa Fernández

**Memoria de Titulación para optar al título de
Ingeniero Electricista**

Profesores Guías: Sr. Pablo Lezana I.

Sr. Mohamed Abdelhamid

Septiembre 2020

Título de la Memoria:

DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE BASADO EN
INTERNET DE LAS COSAS PARA UN VIÑEDO EN EL VALLE DE
CASABLANCA

Autor:

Juan Carlos Figueroa Fernández

Trabajo de Memoria, presentado en cumplimiento de los requisitos para optar
al título de Ingeniero Electricista de la Universidad Técnica Federico Santa
María.

Sr. Pablo Lezana I.

Sr. Mohamed Abdelhamid

Valparaíso, Chile, Septiembre 2020.

**Material de Referencia, su uso no involucra responsabilidad del
autor o la institución**

Agradecimientos.

A mis padres, Inés y Juan Carlos, y a mi hermana Cynde, quienes me apoyaron durante mis años de estudio; a mis sobrinas, Emma y Abigail, que con su alegría me ayudan a seguir adelante para intentar estar cada vez más cerca; a mis abuelos, Inés y Leopoldo, que lamentablemente no ya están, pero fueron un pilar fundamental en mi crecimiento y mi desarrollo; a Mohamed Abdelhamid y Pablo Lezana por guiarme durante la elaboración de la memoria, al “Proyecto Basal FB008 Advanced Center for Electrical and Electronic Engineering (AC3E)” y a Karla, quién logró motivarme a terminar esta última etapa en este difícil y largo, pero satisfactorio camino.

Resumen

En la presente memoria se realiza el proyecto de sistema inteligente de riego y uso de energía renovable para la viña Casablanca, en la ciudad de Valparaíso. Esto se conoce también como agricultura de precisión o agricultura inteligente.

La agricultura inteligente hace referencia al aprovechamiento eficiente de los recursos de la tierra a través de nuevas tecnologías, como por ejemplo el Internet de las Cosas. Esta mejora en el proceso trae beneficios tanto económicos como medioambientales.

Para llevar a cabo la tarea, se realizó el levantamiento del equipamiento y los sistemas utilizados en el viñedo originalmente. El sistema de regadío utilizado por la viña no cuenta con un sistema de medición precisa y en tiempo real que permita tomar decisiones para la optimización del recurso hídrico. Adicionalmente, la bomba utilizada para el regadío es alimentada exclusivamente con energía proveniente de la red de distribución del sector.

La siguiente etapa del proyecto consiste en la selección de una porción del campo para llevar a cabo la instalación de un sistema de monitoreo de regadío y de un sistema fotovoltaico que permita energizar el sistema de regadío en este sector. Además, se dimensiona un sistema de energía fotovoltaica para satisfacer la demanda de la bomba de agua que alimenta todo el sistema de riego de la viña. Con esto se busca disminuir el consumo de energía directamente de la red eléctrica y los costos asociados a éste.

Se implementa una red inalámbrica de sensores que permita el monitoreo de las condiciones ambientales y del suelo del viñedo. Estos datos se enviarán y serán recopilados por medio de una central que estará comunicada con cada uno de los puntos de medición dispuestos en terreno. La estación base envía la correspondiente señal a los actuadores pertenecientes al sistema, de acuerdo a lo medido por los sensores.

Palabras Clave: Agricultura de Precisión, Agricultura Inteligente, Internet de las Cosas, Energía Renovable, Red Inalámbrica de Sensores, Sistema Fotovoltaico.

Abstract

This thesis presents a project about smart irrigation system and renewable energy for Casablanca vineyard, located in Valparaiso, Chile. This is also known as smart agriculture or precision agriculture.

Smart agriculture refers to the efficient use of land resources through new technologies, as for example, Internet of Things. This process upgrade benefits not only the economics part of the business but also it impacts positively on the environment.

To carry out the task, it is necessary to first take a look of what is on field, which equipment is used and what is the systems originally used by the vineyard. The irrigation system does not count with a precise measurement on real time of what is happening on field, therefor is not possible to take actions to optimize the water usage. Additionally, the irrigation pump is powered exclusively by energy coming from the electrical distribution network.

Next step on this project is about select the right portion of the field to install the monitoring system and the photovoltaic system.

The photovoltaic system is designed to fulfill the energy demanded by the irrigation pump for this part of the vineyard. This measure is taken in order to reduce the water pump energy consumption directly from the network and with it, all the costs associated to this.

It implements a wireless sensor network designed to monitor the ambient and soil vineyard conditions. This data will be sent and storage by the base station which is connected to each of the measure points on field. The base station sends a signal to the actuators included on system, according to what was measure by the sensors in first place.

Key words: Precision Agriculture, Smart Agriculture, Internet of Things, Renewable Energy, Wireless Sensor Network, Photovoltaic System

Índice

Agradecimientos.....	viii
Resumen	x
Abstract.....	xii
I. Desarrollo	1
Introducción.....	3
Capítulo 1: Presentación del problema.....	9
1.1. Agua de regadío.	9
1.2. Monitoreo de condiciones medioambientales y soluciones estándar.	11
1.3. Energía eléctrica.	13
Capítulo 2: Propuesta de Solución	17
2.1. Red inalámbrica	17
2.1.1. Niveles del protocolo de comunicación:	18
2.2. Sistema Fotovoltaico.....	24
2.2.1. Paneles solares:.....	30
2.2.2. Regulador de Carga:	31
2.2.3. Baterías:	32
2.2.4. Inversor:.....	34
Capítulo 3: Implementación del sistema de riego inteligente con energía fotovoltaica.....	37
3.1. Dimensionamiento de Sistema Fotovoltaico	37
3.1.1. Ubicación y orientación:.....	37
3.1.2. Consumo de Energía Estimado:	38
3.1.3. Baterías	39
3.1.4. Paneles Fotovoltaicos	40
3.1.5. Regulador de Carga	42
3.1.6. Inversores AC/DC	43
3.1.7. Diagrama Unilineal.....	47
3.2. Resultados FV	48
3.3. Simulación WSN	52
3.3.1. Red de Sensores Inalámbricos:.....	52
3.3.2. Casos de estudio.	52
3.3.3. Definición de parámetros.....	52
3.3.4. Simulaciones.....	53

3.3.5. Resultados Simulación	56
3.4. Implementación en terreno WSN.....	58
3.4.1. Ubicación.....	58
3.4.2. Configuración y Programación.....	59
3.4.3. Resultados Implementación.....	60
3.5. Análisis Financiero y Emisiones de CO2	62
3.5.1. Emisiones de CO2	62
3.5.2. Análisis Financiero.....	63
Conclusiones.....	66
Referencias	69
II. Anexos.....	72

I. Desarrollo

Introducción

Antecedentes Generales

En Chile la agricultura es una parte importante de la economía nacional, aportando el 3.0% del PIB con respecto al año 2016 y llegando a ocupar 4.138.216,1 hectáreas de superficie nacional plantada o sembrada. De ésta, la actividad vitivinícola ocupa un 3,5% a nivel nacional, con 145.873,6 hectáreas utilizadas, mientras que la región de Valparaíso cuenta con 9.819,05 hectáreas plantadas, de acuerdo a información del año 2017[1].

Esta memoria abordará el caso de la Viña Casablanca. Para este caso se requiere actualizar ciertos aspectos del proceso productivo. Uno de estos corresponde al monitoreo de las distintas variables que influyen en el correcto crecimiento de las plantaciones, con especial énfasis en la humedad del suelo siendo éste el valor más importante a tener en cuenta. El otro punto corresponde a la forma de energización, donde se desea utilizar energía eléctrica desde fuentes renovable para la alimentación de su bomba de riego, lo que permitirá disminuir el consumo energético desde la red de distribución y la huella de carbono (CO₂).

Viña Casablanca posee una extensión aproximada de 55 hectáreas. Está localizada en la ciudad de Casablanca (Valparaíso, Chile) ubicada geográficamente en 33°17'40,19" S, 71°24'49,62" O y a aproximadamente 265 metros sobre el nivel del mar. Dentro de la viña, se eligió un sector específico para realizar el proyecto llamada "Maitén 1A" que posee una superficie aproximada de 1 hectárea. (ver figura I.1) En "Maitén 1A" existen 3.250 unidades de parras, separadas 1,5 metros entre sí y donde las hileras se encuentran separadas en 2,5 metros, formando un total de 62 filas.



Figura I.1. Imagen satelital Maitén 1A.

Contexto

Casablanca, por su localización en la región de Valparaíso y geografía de valle, cuenta con una gran cantidad de días soleados, además de ser una comuna principalmente rural, o sea, posee grandes extensiones de campo y sin edificar. Sumado a esto, durante los últimos años ha existido un alza constante en el valor de la energía, (144\$/kWh para tarifa residencial) y una constante sequía, siendo declarada durante el mes de septiembre de 2019 la región de Valparaíso como zona de catástrofe, teniendo hasta un 70,5% menos de precipitaciones comparado con la misma fecha en un año normal [2].

Todo esto beneficia la aparición de alternativas de uso más racional de los recursos (ecológicas) y que permitan sostener la producción agrícola, en este caso particular la energía fotovoltaica. Como prueba de esto existen dos ejemplos recientemente instalados en la comuna de Casablanca: el Parque Solar Fotovoltaico El Olivillo con una potencia de 10,178MW y la instalación de 80 paneles en el sector de la Vinilla para extraer agua de un pozo.

Por otro lado, con el fin de disminuir el uso del agua en los campos, sin afectar la calidad del producto, se ha masificado la utilización de nuevas tecnologías de comunicación en Europa (España) y Norte América (California) para el monitoreo de las condiciones ambientales de las plantaciones. Estos ejemplos pueden ser fácilmente replicados en nuestro país, donde existe una gran industria del agrícola y en este caso en particular, del vino.

Descripción del Proyecto

El proyecto en la Viña Casablanca consta de dos partes, el dimensionamiento de una instalación fotovoltaica para alimentar una bomba de regadío y una red inalámbrica de sensores que permitirá medir y controlar las variables en tiempo real.

El sistema fotovoltaico debe energizar el motor de la bomba de riego de marca WEG, modelo W22 y con una potencia de 30kW, alimentación trifásica y 50 Hz. Por medio de esta bomba se riega todo el sector de la viña ubicado en la planicie del terreno.

Existen dos tipos de generación fotovoltaica: stand-alone (aislada) y on grid (conectada a la red). La opción aislada es perfecta para sitios donde no ha sido posible llegar con la red de distribución por distintos motivos (monetarios, geográficos, etc.), mientras que la opción conectada a la red, permite, además de tener el respaldo de la red de distribución, vender la cantidad de energía que se genera por la instalación fotovoltaica y que no es utilizada, amparándose en la ley 20571 llamada “Netbilling”. La elegida para este caso en particular es la opción aislada, esto significa que el conjunto será conformado por paneles solares, inversores, controlador de carga y un sistema de respaldo (baterías).

Al dimensionar el sistema de paneles fotovoltaico, hay que tener en consideración la Máxima Tensión del Sistema, la tensión a circuito abierto y la corriente de cortocircuito, datos que se encuentran en los datasheet de cada panel. Con estos valores es posible elegir el mejor arreglo y el máximo número de módulos conectados entre sí.

Las curvas características de los paneles fotovoltaicos son obtenidas cuando los parámetros son medidos bajo condiciones estándar STC, siglas que en inglés significan Standard Test Conditions. (Ver figura I.2 y I.3) Estos valores estándar corresponden a irradiancia solar de 1000W/m^2 , temperatura del módulo 25°C y valor espectral de 1,5AM [3].

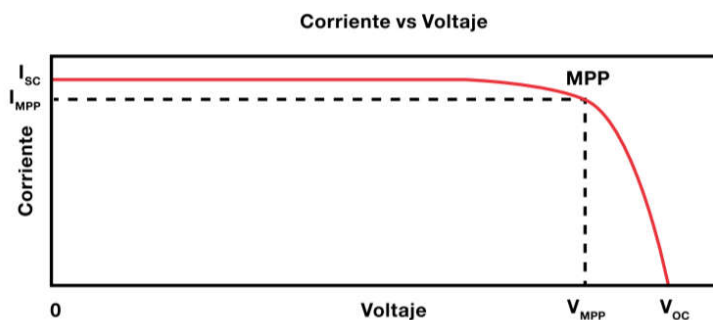


Figura I.2. Curva característica panel fotovoltaico I v/s V.

La radiación solar del lugar elegido en Casablanca es aproximadamente $6,96\text{kWh/m}^2/\text{día}$, con un máximo de $8,22\text{kWh/m}^2/\text{día}$ durante el mes de diciembre y un mínimo de $2,38\text{kWh/m}^2/\text{día}$ durante junio.[4]

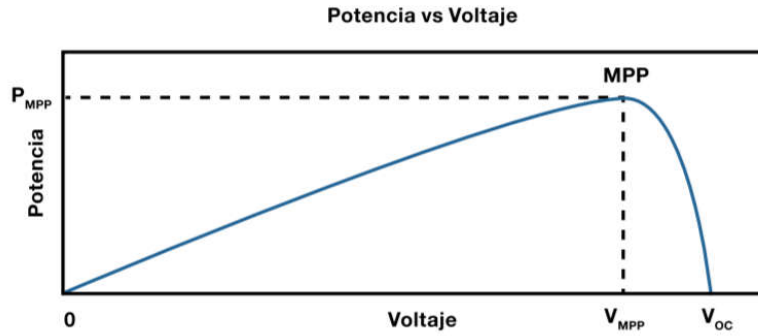


Figura I.3. Curva característica panel fotovoltaico P v/s V.

Otros criterios a considerar para el diseño de instalaciones fotovoltaicas son la orientación, la inclinación, el azimut y las sombras, que se detallarán más adelante.

Los conductores, protecciones y canalizaciones necesarias para desarrollar el proyecto son estimados en base a la norma chilena Nch 4/2003.

Finalmente, la simulación del sistema fotovoltaico se realiza mediante el software PVsyst, un software muy usado en la estimación de instalaciones solares.

Por otro lado, la red inalámbrica está diseñada para medir y transmitir datos hasta una estación base, y utilizar esos mismos valores medidos para comandar actuadores. La información será almacenada en una base de datos local. Esta información puede ser visualizada a través de cualquier dispositivo con acceso a la red. La estación base o centro de comandos se comunica con los sensores en terreno a través de Wi-Fi.

La red inalámbrica es construida tomando como base la Agricultura Inteligente y el Internet de las Cosas, más conocido como Internet of Things o IoT, por sus siglas en inglés. Para el desarrollo de ésta, se ha elegido utilizar componentes de bajo costo, siendo un aspecto importante a la hora de decidir qué equipamiento utilizar. Así mismo, el lenguaje de programación y el protocolo de comunicación utilizados para el desarrollo del proyecto son licenciados open source o fuente abierta, por lo que no existe restricciones ni dinero que pagar por utilizarlos.[5]

La red cuenta con estaciones o nodos de monitoreo, nodos de actuación y una estación base. (ver Tabla I.1) Las estaciones de monitoreo están compuestas por un microcontrolador

Arduino o similar y sensores de distintos tipos, que se instalan por toda la zona elegida. Estos nodos se comunican a través de Wi-Fi con una estación base, compuesta de un mini computador (Raspberry Pi). Al analizar los datos recibidos desde terreno, la estación base es capaz de ordenar a los nodos de actuación, basados también en un microcontrolador similar al Arduino, para que accionen las válvulas. De acuerdo a las mediciones de la humedad del suelo, es posible generar un código que indique a cada válvula cuándo es necesario abrir y regar el sector correspondiente.

Tabla I.1. Especificaciones de dispositivos IoT.

#	Transmisor	Receptor	Dispositivo
1	Nodo	Microcontrolador	NodeMCU
		Sensores	Temperatura Ambiente
			Humedad Ambiente
			Humedad del Suelo
2	Estación Base	Energía	Baterías Recargables
		Microcontrolador	Raspberry Pi
		Wi-Fi/4G	Huawei 4G

Objetivos.

- Dimensionar un sistema fotovoltaico para la alimentación y funcionamiento de una bomba de agua independiente de la red de distribución eléctrica, entregando autonomía y bajando los costos asociados con el consumo de energía.
- Diseñar e implementar un sistema de regadío inteligente para una viña, en base a sistemas comerciales y así mantener el control absoluto sobre el comportamiento de la viña.
- Diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos para la recolección de datos relevantes para el buen funcionamiento de una viña. Con esta recopilación de información es posible generar planes de contingencia de ser necesario o planificar de mejor manera los regímenes de riego para optimizar el recurso.
- Realizar un estudio económico para la implementación a gran escala del sistema de regadío inteligente. A través de una sectorización del predio, es posible entregar autonomía a cada sector para utilizar la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de las plantaciones, manteniendo un certero control.

Será posible sectorizar el riego con el fin de disminuir el uso y pérdidas de agua en riego de áreas que han superado el nivel necesario. A su vez se limitará el uso de energía eléctrica para alimentar la bomba que alimenta la viña.

Estructura de la memoria:

La presente memoria cuenta con 4 capítulos:

- Capítulo 1: Presentación del Problema y soluciones estándar,
- Capítulo 2: Propuesta de Solución,
- Capítulo 3: Implementación,
- Capítulo 4: Conclusiones y Apéndice.

En la sección Anexo se encontrará el material que se ha utilizado como referencia, además de hojas de datos y códigos comentados. Material adicional como catálogos, manuales de uso y otros, se incluyen en el disco adjunto.

Capítulo 1: Presentación del problema

La Viña Casablanca se planteó el desafío de ser parte de la agricultura sustentable y así utilizar de la mejor manera, medioambiental y productivamente, los recursos con los que cuenta.

Por lo tanto, se busca mantener la producción de vino al menos constante durante los años siguientes, considerando la sequía que afecta a la zona central de Chile y teniendo en mente que el año 2018, la producción de vino fue de 683.091 litros de vino [6].

Es posible identificar 3 aspectos claves dentro del funcionamiento de la viña para entender de mejor manera cuáles son los desafíos que se enfrentan:

- El consumo de agua de riego;
- Monitoreo de las zonas plantadas;
- El consumo de energía eléctrica.

1.1. Agua de regadío.

La viña por estudiar cuenta con un sistema de regadío instalado previo a la compra de éste por parte de la viña Casablanca. El agua se obtiene desde un pozo de la viña, alimentado por el estero lo Ovalle, y esta agua es de uso exclusivo para el riego de esta plantación. Como las precipitaciones han disminuido debido a los efectos del cambio climático, existiendo un déficit en las precipitaciones de 43%, se necesitan adoptar medidas de ahorro y mejoras en el uso del agua. De acuerdo con los anuarios elaborados por la Dirección General de Aeronáutica Civil y su Dirección Meteorológica de Chile (Estación de medición Rodelillo), el año 2018 fue el décimo más seco y el más seco de los últimos 10 años, sin considerar los datos del 2019. [7]

Tabla 1.1. Índice de lluvias por año.

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Lluvia mm	442,7	342,5	339,6	485,3	149,7	382,3	510,9	392,3	596,4	257,1

Para regar la totalidad del terreno plantado se necesitan aproximadamente 77.692m³ de agua al año [6], que son suministrados de forma constante por la Bomba 1 y dirigidas a los 6

sectores que componen el plan o Santa Isabel, como se le denomina a ese lugar. La Bomba 1 trabaja para el riego durante los meses de octubre a mayo.

Maitén 1A, la hectárea de terreno plantado elegido para el análisis, tuvo un peak de riego en el mes de febrero de 2018, cuando se le designaron 42 horas de riego y un mínimo de 8 horas en el mes de noviembre (0 horas entre los meses mayo y septiembre), en el mismo año, de acuerdo con lo registrado en la base de datos de la viña. [8]

Para obtener un crecimiento óptimo de la uva, la planta debe ser suministrada con una cierta cantidad de agua, de acuerdo con las necesidades de cada cepa de vino que se encuentren en la zona de estudio, que en este caso corresponde a Sauvignon Blanc.

Existen otros factores relacionados con el agua que afectan el desarrollo de la planta, los más importantes son:

- Evapotranspiración: corresponde a la pérdida de agua que sufre el cultivo debido a dos fenómenos combinados, la evaporación del agua desde el suelo y la transpiración que sufre directamente la planta.
- Capacidad del Suelo (Field Capacity - FC): se puede definir como la cantidad de agua contenida en el suelo, al cabo de unos días donde el agua comienza a drenar por el suelo de forma más o menos constante a una determinada profundidad. Su valor se expresa como porcentaje.

Según estudios, este valor no es único para cada profundidad, si no que depende de varios factores que influyen e impiden que exista un equilibrio. Entre esos factores es posible encontrar el tipo de suelo, la temperatura, la evapotranspiración y la historia previa del suelo.

- Punto de Marchitez Permanente (Permanent Wilting Point – PWP): el PWP hace referencia a la cantidad de agua que es retenida por el suelo y que la planta ya no puede absorber. Es expresada en porcentaje y es medida como cantidad de agua por unidad de peso o volumen del suelo que la planta no puede recibir y por lo tanto que la marchitará [9].

Finalmente, teniendo los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, se restan en ese mismo orden (FC – PWP) y es posible calcular la cantidad de agua disponible para la planta. El suelo donde se encuentra la viña está compuesto de arcilla granítica, característica de la zona de Casablanca.

1.2. Monitoreo de condiciones medioambientales y soluciones estándar.

La viña Casablanca no posee actualmente un sistema de monitoreo autónomo en terreno que pueda entregarle información del comportamiento de las plantaciones y del ambiente. En el año 2013, adquirieron unos dispositivos cuya finalidad era recoger datos sobre la humedad del suelo y temperatura, entre otros. Este sistema falló – la batería de los equipos se agotó – y fue imposible cambiarlas por problemas de mantención de la empresa encargada de los dispositivos.

El encendido y apagado de la Bomba 1 es realizado manualmente por un operario de la viña, por lo que se requiere una modernización del sistema de control de la bomba.

Por sus características geográficas, Casablanca tiene períodos de heladas en invierno y primavera. Éstas son muy dañinas para la vegetación que crece en el sector, llegando incluso a destruir la planta si la exposición a la helada es prolongada o en períodos consecutivos, por lo que la viña no está ajena a sufrirlas. Para contrarrestar los efectos de las bajas temperaturas la viña ha instalado en puntos estratégicos del campo, hélices que comenzarán a funcionar cuando la temperatura sea lo suficientemente baja, usualmente se utilizan al descender de los 0°C reduciendo considerablemente los daños por heladas en las plantas. Estas hélices son turbinas eólicas que son puestas en funcionamiento a través de combustible gas licuado.

Con el propósito de controlar y monitorear de forma sencilla y permanente el terreno que se está regando, Viña Casablanca adquirió equipamiento que consistió en un set de sensores que fueron instalados en distintas partes de la viña para medir la humedad del suelo, y además se instaló un panel de control automático de válvulas, bombas y turbinas anti heladas.

El control automático fue realizado a través de los relés instalados en la sala de bombas. El relé elegido e instalado para cumplir esta labor es el KH-103-4C-24VAC. El detalle interno de este relé se aprecia en la figura 1.1.

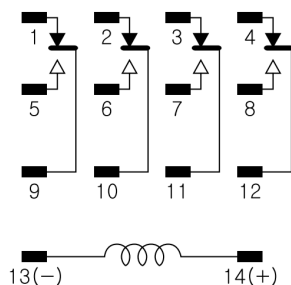


Figura 1.1 Detalle de conexionado interno del relé KH-103-4C.

En cuanto al monitoreo del terreno, el sistema llamado EnviroSCAN Plus fue adquirido por la viña. Éste cuenta con 4 nodos de medición repartidos por todo el campo, que fueron ubicados en sectores específicos para obtener muestras representativas. Cada punto instalado en el campo puede gestionar información acerca de las variables medioambientales, como humedad del suelo y temperatura ambiental. Se accede a los datos a través de dos puertos físicos y a través de la web diseñada específicamente para recoger los datos desde las sondas. Esta información es manejada a través del software IRRIMAX, de propiedad de los creadores del sistema de monitoreo.

Al momento de contactar a la viña para el ofrecimiento de una solución, el control automático no funciona por fallas desconocidas, mientras que el sistema de monitoreo se encontraba inhabilitado por altos costos de mantención.

En el mercado chileno, es posible encontrar soluciones bastante similares entre sí para implementar el control y supervisión de predios agrícolas. Las empresas dedicadas al monitoreo utilizan el mismo principio: una sonda robusta que permita medir principalmente la humedad desde el suelo, con capacidad de almacenamiento, transmisión de datos de forma inalámbrica y un software que sea capaz de manejar esa información para un mejor entendimiento del cliente final. Dos ejemplos de estas empresas son AquaCheck y Sentek, ambas con una vasta experiencia en el monitoreo agrícola

La empresa sudafricana AquaCheck, con operaciones en Chile, ofrece 3 tipos distintos de sondas, dependiendo de la complejidad o las necesidades del consumidor: Sonda bajo la superficie, sonda clásica y la sonda básica inalámbrica. La sonda utilizada por AquaCheck (y por Sentek) corresponde al tipo FDR (un sensor capacitivo) que mide la constante dieléctrica de la tierra y así obtiene un valor proporcional de la humedad del suelo. Trae incorporado un GPS para identificar a cada sensor. La sonda inalámbrica tiene la posibilidad de tener hasta 6 sensores, mientras que las dos opciones restantes son sondas cableadas y pueden tener hasta 15 sensores [10].

Como fue mencionado anteriormente, la viña eligió el sistema EnviroSCAN de la empresa australiana Sentek para el monitoreo de la humedad del suelo. Tiene 5 tipos de transmisores que serán asociados a la sonda: PLUS Compact, PLUS Standard, Sentek SOLO, MULTI y RT6. Sentek SOLO corresponde a un adaptador para una memoria USB, RT6 es una opción cableada, que puede recibir la información de hasta 8 sondas. Los 3 restantes son capaces de

conectarse a internet a través de CDMA/GPRS/3G o con una opción satelital, además pueden recibir la información de hasta 16 sensores.

1.3. Energía eléctrica.

El sistema de regadío está conectado a la red de distribución de energía eléctrica a través del medidor 450-2 instalado dentro del terreno, y se puede conocer el consumo de electricidad de esta parte de la viña que alcanzó los 101.340kWh en el año 2018 [6], cuyo costo en moneda local corresponde a \$7.272.919 (ver tabla 1.2). Esto corresponde a alrededor de un 70% del consumo total de la viña Casablanca. El consumo de la bomba en el año 2018 fue de 13.200kWh, alrededor de un 10% del total de energía demandada en un año.

El viñedo se encuentra conectado a la red de distribución a través de un contrato con energía Casablanca. Esto le asegura suministro todos los días del año al mismo precio, que para el año 2018 correspondieron a alrededor de 72\$/kWh. Al comparar el valor del kWh para la viña, es casi un 50% más barato que el costo de la tarifa residencial en Casablanca, que bordea los 144\$/kWh.

Para realizar el riego, se ha utilizado una bomba de marca WEG modelo W22 IE2 (High Efficiency), con las características mostradas en la Tabla 1.3. Estos motores tienen que cumplir los requisitos impuestos en las normas IEC60034 y 60072.

Este equipo, junto con el resto de los componentes del sistema de regadío y tratamiento químico, están ubicados a un costado de las oficinas, en el cuarto de bombeo, como se muestra en la Figura 1.2.

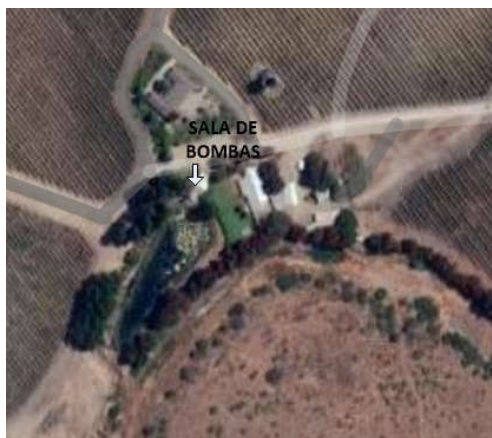


Figura 1.2. Geolocalización de la sala de bombas.

Tabla 1.2. Índice de consumo de Electricidad año 2018.

Índice de consumo de Electricidad 2018		
Sector	Santa Isabel (SI)	
Medidor	450-2	
Mes	KWh	\$
Junio	3.180	226.951
Julio	2.880	205.541
Agosto	3.120	222.668
Septiembre	2.520	179.848
Octubre	5.160	313.958
Noviembre	12.060	733.785
Diciembre	11.340	689.976
Enero	18.240	1.109.847
Febrero	15.000	912.831
Marzo	21660	1.318.129
Abril	10.140	617.075
Mayo	4.200	225.594
Total Anual	109.500	6.556.203

Tabla 1.3. Características principales de la bomba WEG.

Marca	Potencia HP/kW	Tensión V	Frecuencia Hz	Eficiencia %	Factor de Potencia	Grado de Protección
WEG	40/30	380	50	92,9	0,87	IP55

El gasto energético por el funcionamiento de la bomba no es parejo ni permanente, éste depende de los meses donde se produce el crecimiento del fruto y se activa el plan de trabajo de la viña. Este proceso de las plantas va desde octubre hasta mayo del año siguiente, meses que corresponden principalmente a primavera y verano en Chile.

Es usual que, durante los meses de invierno, el agua provista por la bomba que alimenta el sector de Santa Isabel sea utilizada para riego de la vegetación presente en el terreno. Por esta razón, el consumo energético disminuye considerablemente entre los meses de junio y septiembre.

Al no existir un control automático del funcionamiento de la bomba o de la distribución del agua, el consumo energético se produce principalmente en jornada laboral durante el día con un contrato energético a precio fijo, sin la posibilidad de negociar un nuevo contrato eléctrico que permita establecer el riego durante los períodos donde la energía eléctrica se puede

comprar más barata o donde el agua pueda ser aprovechada de mejor manera por las plantaciones.

Dentro de la sala de bombas, se tiene también tableros con las protecciones correspondientes para todos los componentes del sistema, donde se puede encontrar una bomba de agua, una bomba para el tratamiento químico y una bomba para el agua del pozo.

La solución más sencilla es mantener directamente la alimentación desde la red de transmisión local, usualmente es lo más económico también, debido a que no requiere ningún tipo de inversión. Esto no es tan factible si se piensa en lugares remotos o plantaciones agrícolas con difícil acceso a la red local de energía eléctrica.

Estos últimos años las alternativas de energía renovable han tenido una gran disminución en sus costos [11], y esto las convierte en una opción viable para el autoconsumo. Las dos opciones más utilizadas son la generación fotovoltaica y eólica. En Chile la balanza se inclina hacia la energía fotovoltaica debido a la enorme capacidad de generación solar que se presenta, principalmente en el norte, lo que queda demostrado con los 2.720MW instalados hasta marzo del 2020 y que representa el 11,22% de la capacidad total instalada [12], como se observa en la figura 1.3. En el caso específico de la región de Valparaíso la mayor parte de la capacidad instalada es a base de fuentes no renovables fósiles y altamente contaminantes, como el petróleo, el gas natural y el carbón. Entre estos 3 combustibles se satisface el 89,1% de la capacidad instalada en la región.

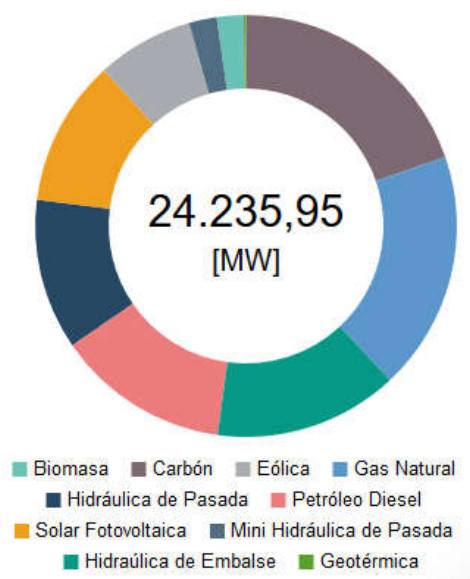


Figura 1.3 Capacidad total de energía instalada en Chile (fuente: energiaabierta.cl)

La posibilidad de modificar la matriz energética con soluciones renovables no contaminantes abre una gran cantidad de oportunidades para los agricultores de ocupar tierras en sus campos con la meta de disminuir los gastos en electricidad y darles autonomía energética. En los siguientes capítulos se analizará una instalación fotovoltaica aislada como solución para el riego inteligente, disminución de consumo de energía de la red y la disminución de contaminación simulando los distintos escenarios.

Capítulo 2: Propuesta de Solución

Se ha tomado conocimiento de las condiciones de la viña con respecto al monitoreo y la forma de energizar una bomba de regadío.

Se ha decidido implementar una red inalámbrica de sensores junto a una instalación fotovoltaica, la primera con el fin de medir la temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad del suelo y así tener un mejor control del riego en plantaciones de la viña y la segunda para energizar la bomba y aumentar el consumo de energía renovable a través de un sistema compuesto por paneles solares, controladores de carga, baterías e inversores. El detalle del sistema completo propuesto como solución de agricultura de precisión se puede apreciar en la figura 2.1.

El área que será monitoreada se llama Maitén 1A y se produce uva del tipo Sauvignon Blanc. Este sector fue plantado en el año 2014, contando con 5 años continuos de producción de uva.

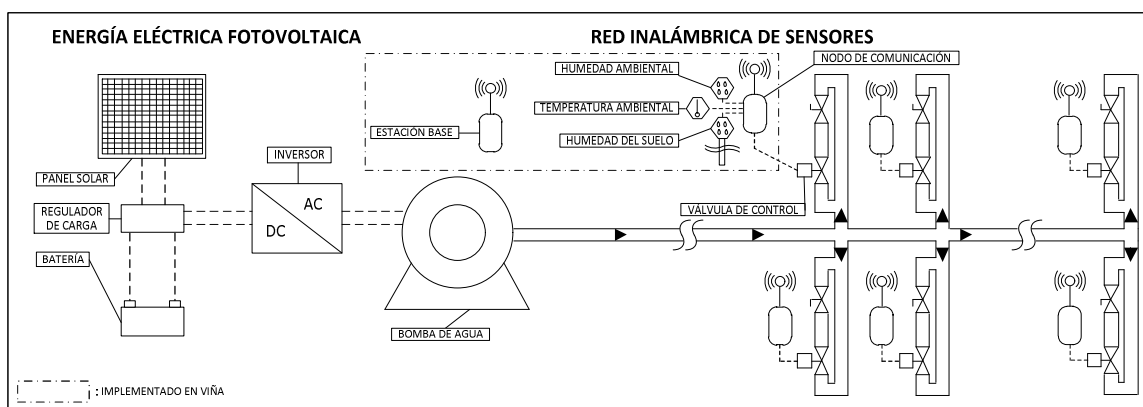


Figura 2.1. Detalle de la solución propuesta para la viña Casablanca.

2.1. Red inalámbrica

El sistema de viña inteligente combina componentes físicos, como sensores y microcontroladores, con redes de comunicación y aplicaciones inteligentes. Este sistema tiene por objetivo monitorear las condiciones de las plantas en tiempo real y ayudar con la toma de decisiones. La arquitectura propuesta está compuesta por cuatro niveles detallados a

continuación: la capa física, capa de red, capa de servicio y capa de aplicación. (ver figura 2.2)

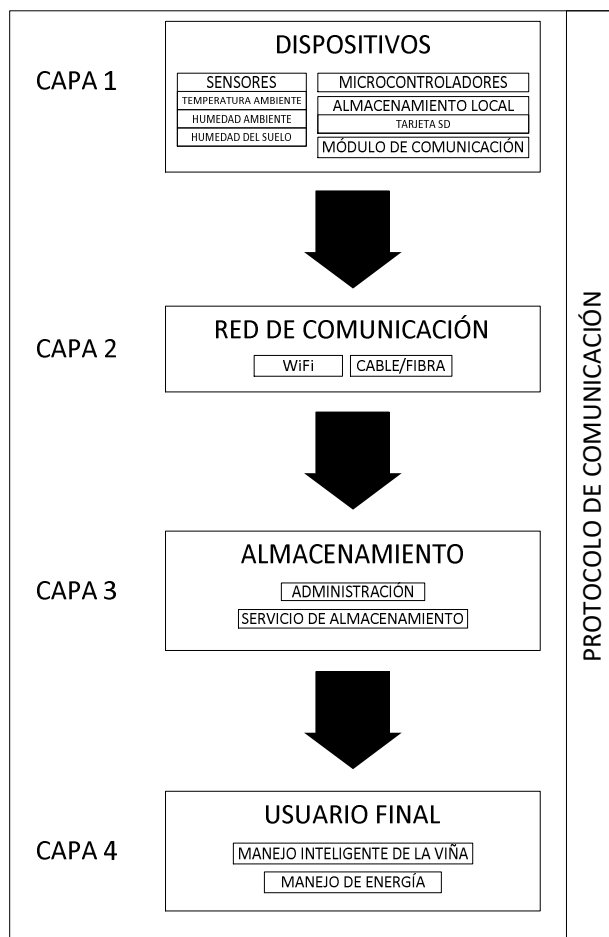


Figura 2.2. Niveles del protocolo de comunicación.

2.1.1. Niveles del protocolo de comunicación:

Capa 1 – Capa Física (Dispositivos). En esta capa se puede agrupar a los nodos de sensores y la estación base. Los nodos permiten medir, accionar y comunicar la información tomada en terreno, a través de Wi-Fi, hacia la estación base. La estación base recibe y almacena estos datos para guardarlos finalmente en una base de datos.

El nodo que se ha diseñado para esta solución se compone de tres sensores para medir la temperatura ambiental, la humedad del suelo y la humedad ambiental, y de un microcontrolador, que actúa como el cerebro del nodo, recibiendo la información desde los sensores y enviándola hacia la estación base.

La estación base es un microcomputador o microprocesador capaz de procesar los datos emitidos desde los nodos, almacenar la información y subirla a un visor en la web, debe contar con toda la programación necesaria para que la comunicación que requiere entablar con los nodos sea exitosa y debe estar conectada a internet a través de ethernet a un módem. Los datos recibidos desde terreno pueden ser almacenados paralelamente en una tarjeta microSD para ser analizados en terreno.

La capa física del proyecto se compone de los siguientes elementos:

- Sensor de humedad de suelo: SEN0193

Este sensor capacitivo mide la humedad del suelo. La principal diferencia con los sensores resistivos más comunes es que está hecho de un material resistente a la corrosión, por lo que su vida útil es mayor. Cuenta con una salida analógica para enviar los datos hacia el microcontrolador.

Tabla 2.1. Características Sensor Humedad del Suelo.

Dispositivo	Sensor humedad del suelo SEN0193
Tensión de funcionamiento	3,3 ~ 5,5 VDC
Corriente de funcionamiento	5 mA
Rango de medición	0 – 100 %HR
Tamaño	99 mm x 16 mm
Peso	15 g
https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193	



Figura 2.3 Sensor de Humedad del Suelo SEN0193.

- Sensor de temperatura y humedad ambiental: DHT 11

Consta de un sensor capacitivo para la humedad y un termistor para la temperatura ambiente. Los datos son enviados a través de una señal digital.

Tabla 2.2. Características Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental.

Dispositivo	Sensor de Temperatura y Humedad ambiental DHT11
Tensión de funcionamiento	3 ~ 5 VDC
Rango de medición temperatura	0 – 50 °C
Precisión temperatura	± 2 °C
Rango de medición humedad	20 – 90 %HR
Precisión humedad	5 %HR
Tamaño	16 mm x 12 mm x 5 mm
Peso	2,4 g
https://wiki.dfrobot.com/DHT11_Temperature_and_Humidity_Sensor__SKU__DFR0067	



Figura 2.4 Sensor de temperatura y humedad ambiental DHT11.

- Microcontrolador Arduino para nodo: NodeMCU (ESP8266)

Es un chip que funciona bajo el protocolo TCP/IP de Wi-Fi. Cuenta con un software apropiado para la conexión 802.11. La gran ventaja es su bajo precio.

Tabla 2.3. Características Microcontrolador ESP8266.

Dispositivo	NodeMCU – ESP8266
CPU	Tensilica Xtensa LX106
Protocolo inalámbrico	IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi
Pines de Conexión	13 GPIO, 1ADC (10 bits), 3 salidas de tensión (3,3 V), 1 entrada de tensión (5 V) y 4 tierras (GND)
Tensión de funcionamiento	5 VDC
Corriente de funcionamiento	80 mA
https://programarfacil.com/podcast/nodemcu-tutorial-paso-a-paso/	

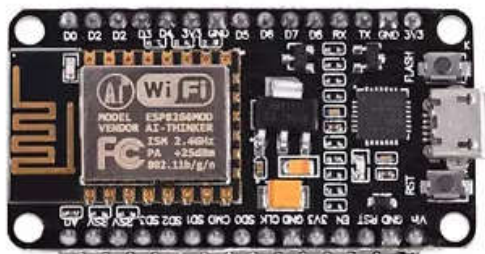


Figura 2.5. Microcontrolador ESP8266.

- Microcomputador Raspberry Pi 3b+ (Rpi 3b+) para estación base:

El Raspberry es un SBC o Single Board Computer es lo que su traducción exacta significa, un computador contenido en una sola placa de circuitos. Tiene una ranura para añadir una tarjeta micro SD, donde quedará respaldada la base de datos creada al tomar datos.

Tabla 2.4. Características Microcomputador Raspberry Pi.

Dispositivo	Raspberry Pi 3 B+
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC
Protocolo inalámbrico	2.4 GHz; IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi; Bluetooth 4.2 BLE
Conectividad de red	Gigabit Ethernet over USB 2.0
Voltaje de funcionamiento	5 VDC
Corriente de funcionamiento	2,5 A



Figura 2.6. Microcomputador Raspberry Pi 3B+.

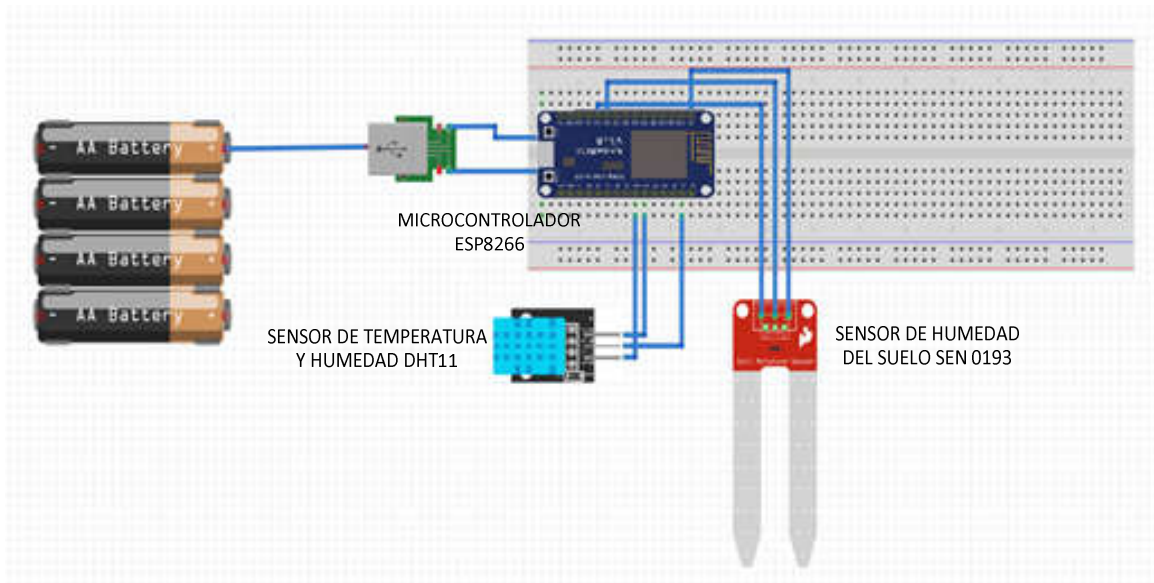


Figura 2.7. Esquema del prototipo de medición agrícola.

Capa 2 – Capa de Red de Comunicación: se puede encontrar la forma en que interactúan los distintos elementos del sistema. Tomando en consideración cada caso, existe la posibilidad de comunicación cableada o inalámbrica. Por la parte cableada está la conexión a internet a través del cable ethernet, por la parte inalámbrica los dispositivos pueden estar conectados a través de Wi-Fi o Zigbee. Para lograr que ambos dispositivos conversen entre sí, fue necesaria programación en ambas partes del sistema. Por el lado del nodo, utilizando Arduino IDE, una plataforma para escribir el código, fue posible transferir esta codificación al dispositivo y con un visor con acceso en nuestros computadores, poder ver los resultados medidos, se le añade un programa a la placa NodeMCU ESP8266 el que da la orden de transmitir la información hacia un receptor (ver Anexo A). La estación base por su parte, necesita un grupo de aplicaciones denominadas bajo el acrónimo LAMP. Linux, Apache, MQTT, PHP forman ese acrónimo y a su modo, son distintos niveles para lograr recibir y manejar los datos.

- Linux: es el núcleo o kernel de un software libre diseñado a principio de los años 90, por un universitario de la Universidad de Helsinki en Finlandia, llamado Linus Torvalds. Este kernel está liberados para que cualquiera pueda modificar o hacer su

propia versión del sistema operativo construido en base a este núcleo. Además de su versatilidad, también posee una gran robustez y es posible instalarlo en microchips, lo que ha permitido en gran parte la masificación de éste. En el caso particular de estudio, se utiliza una versión llamada Ubuntu v16.04 y sobre esta plataforma se instalarán las aplicaciones mencionadas a continuación.

- Apache: existe la Apache Software Foundation (ASF), una organización sin fines de lucro, que se encarga de mantener activo y desarrollar todos los proyectos asociados a Apache, dentro de los que se encuentra el servidor HTTP Apache que será usado. Una de las particularidades de este servidor es que la gran parte de las debilidades en la seguridad sólo puede ser utilizadas localmente, lo que dificulta o limita la intromisión o robo de datos de manera remota.
- MQTT: Message Queue Telemetry Transport es un protocolo M2M (Machine-to-Machine) que busca conectar varios dispositivos o clientes independientes entre sí, que se enlazan con un nodo central, utilizado principalmente en soluciones que integran Internet de las Cosas (IoT). Se le considera una especie de transporte para la publicación y suscripción de mensajes o tópicos que se caracterizan por pesar tan sólo unos cuantos bytes. En la red debe existir un bróker, un servidor central capaz de conectar con una gran cantidad de clientes, aceptando mensajes de clientes o transmitiendo a los que se encuentren suscritos para lo que transmite el broker. La figura 13 es un ejemplo de una conexión del tipo estrella entre los clientes, publicando y recibiendo la información, que en cierta forma es administrada por el broker.
- PHP: Hypertext Preprocessor es un lenguaje de desarrollo web de código abierto y que permite generar páginas de manera simple, porque el código PHP incluye templates para realizar la acción que se requiera rápidamente. El cliente sólo podrá acceder a los datos que le hayan asignado permisos, mientras que toda la codificación es ejecutada en el servidor y así, invisible para el cliente final. De esta forma tenemos

una herramienta muy sencilla, eficaz y robusta para generar contenido en páginas web [13].

Capa 3 – Capa de Servicio (Almacenamiento): en esta capa incluimos toda forma de almacenar datos e información que es posible usar en una red de sensores, junto con la administración de estos datos. Como alternativas se tiene tarjetas de memoria flash SD o una base de datos. En el caso a analizar, se utilizará MariaDB y PHP para generar una base de datos a la que se pueda acceder y obtener los resultados segregados, para realizar los estudios y análisis que se estimen conveniente, de igual manera se utilizará la plataforma Thingspeak para compartir las mediciones de los tres sensores que monitorean la zona. En el siguiente capítulo se observarán los resultados obtenidos a través de Thingspeak.

Capa 4 – Capa de Aplicación (Usuario final): El usuario será quién maneje los resultados obtenidos y tomará las medidas que sean necesarias, que en este caso particular corresponde al administrador de la viña. El usuario final podrá visualizar los resultados online teniendo acceso a la plataforma Thingspeak desde cualquier navegador de internet o accediendo a algún almacenamiento local. El desarrollo de una aplicación para el usuario final está más allá del alcance de esta memoria.

2.2. Sistema Fotovoltaico

La alternativa de energía fotovoltaica es propuesta con la finalidad de aliviar el consumo de energía eléctrica transmitida por la red y a la vez, fomentar la autogeneración. Es posible reconocer tres tipos distintos de instalación fotovoltaica dependiendo de las necesidades y las posibilidades de acceder a la red:

- Sistema fotovoltaico aislado de la red con baterías de respaldo, permite al dueño de la instalación independencia para la generación, pero encarecimiento de la solución por efecto del elevado costo de la inversión inicial. No necesita grandes consideraciones en la mantención.
- Sistema fotovoltaico aislado de la red con generadores electrógenos de respaldo es similar al anterior, pero utilizando combustible fósil, como el petróleo, para el

funcionamiento de los generadores. El generador requiere un mayor mantenimiento que las baterías.

- Sistema fotovoltaico con posibilidad de conexión a la red, permite contar con un respaldo robusto en caso de fallas o poca energía del sistema fotovoltaico.

Se decidirá cuál es el mejor régimen de generación, dependiendo de las necesidades del cliente o dueño de la instalación.

Para el caso específico de estudio, se dimensionará una instalación solar aislada de la red eléctrica. Para este fin, se utilizará el software PVSYST, una potente herramienta de simulación de situaciones de generación fotovoltaica. Este programa cuenta con opciones que permiten analizar datos históricos de la radiación, temperatura y a la vez generar resultados referentes a la eficiencia del sistema o de las sombras producidas en las distintas fechas durante el año.

Es importante conocer la trayectoria que sigue el sol en la ubicación geográfica elegida. Para esto, se utilizan datos obtenidos en internet a través de Meteonorm 7.1 (herramienta con el registro de las radiaciones mundiales) y son ingresados en el software PVSYST. Éste generará una carta solar que permite observar el detalle de la posición del sol a cada hora del día, cada día del año. (ver figura 2.8a y 2.8b)

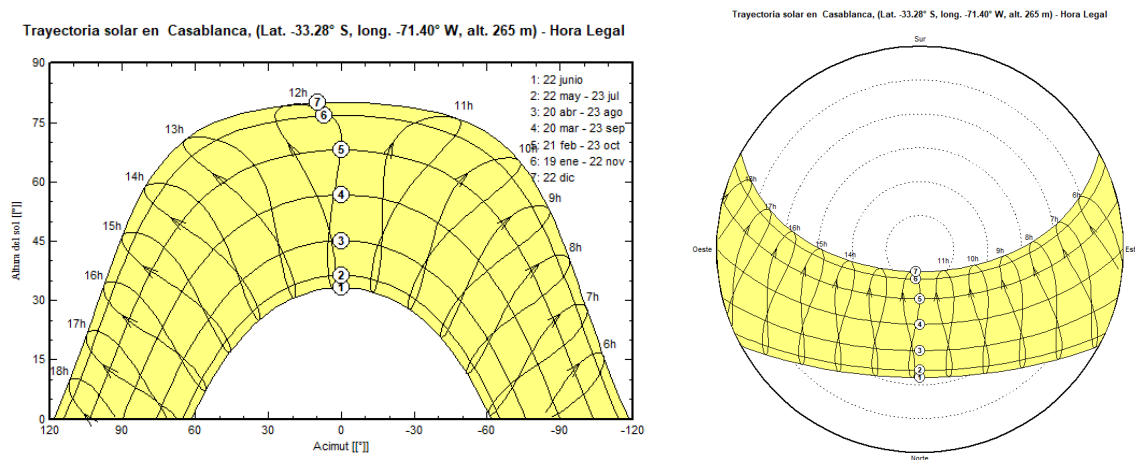


Figura 2.8. Carta solar viña Casablanca según modelado de software PVSYST en a) coordenadas cartesianas y b) coordenadas polares.

Existen tres tipos distintos de radiación solar: radiación solar directa, radiación solar difusa y radiación solar reflejada. Esta información se encuentra disponible para cualquier lugar de Chile que se desee seleccionar, gracias a la herramienta online “Explorador Solar”, de propiedad de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (ver figura 2.9) en colaboración con el gobierno de Chile. Los valores de radiación de un año se observan en la tabla 2.5. Las definiciones de cada tipo de radiación a continuación:

- Radiación directa: es la radiación que sólo es atenuada por efecto de nuestra atmósfera,
- Radiación difusa: es aquella radiación dispersa que logra llegar al suelo y
- Radiación reflejada o suelo, también llamada Radiación de Albedo: corresponde a la parte de la radiación que es reflejada por el suelo y recibida por una superficie inclinada. En la mayoría de los casos, alcanza un valor despreciable en comparación con las anteriores.

Así como la radiación, que corresponde a un factor ambiental y por lo tanto fuera de nuestro control, existen otros factores, dentro de nuestro alcance de manejo, que influyen en el correcto dimensionamiento y elección del sistema fotovoltaico y se detallan a continuación:

Tabla 2.5. Valores de radiación para Maitén 1A en unidades kWh/m²/día.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa	5.94	5.89	5.81	4.6	3.2	3.1	3.28	3.61	4.46	5.0	5.44	5.89
Difusa	1.11	1.05	0.88	0.84	0.77	0.67	0.7	0.85	1.04	1.2	1.22	1.14
Albedo	0.16	0.14	0.12	0.08	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.12	0.14	0.16
Global	7.21	7.08	6.81	5.52	4.02	3.82	4.03	4.52	5.59	6.32	6.8	7.19

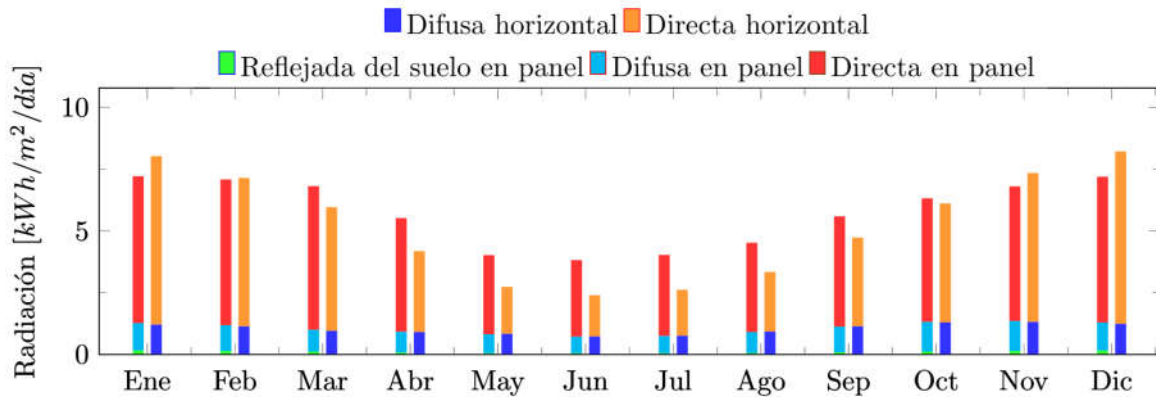


Figura 2.9. Magnitudes de radiación en Maitén 1A. Fuente: Explorador Solar

- **Inclinación:** este valor es determinado principalmente de acuerdo con la latitud en la que se encuentre la instalación. Así, el panel estará posicionado para que la radiación del sol penetre en toda la superficie de éste. En el caso de la viña Casablanca, la latitud corresponde a 33° Sur.
- **Acimut:** es el ángulo o longitud de arco medido sobre el horizonte celeste que forman el punto cardinal norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte del observador situado en alguna latitud sur. Se mide en grados desde el punto cardinal en sentido de las agujas del reloj: Norte-Este-Sur-Oeste. Para este caso, es recomendable utilizar acimut 0°, lo que corresponde al panel orientado directamente hacia el norte, por encontrarse en el hemisferio sur y ser esta posición la que capta una mayor cantidad de radiación solar durante el verano. El detalle de los ángulos asociados al acimut se muestra en la figura 2.10.
- **Potencia peak:** también es llamada Watt-peak y es una medida de la potencia nominal de un dispositivo de energía fotovoltaica en condiciones estándar de prueba en un laboratorio (1000W/m²; AM 1,5; 25°C).

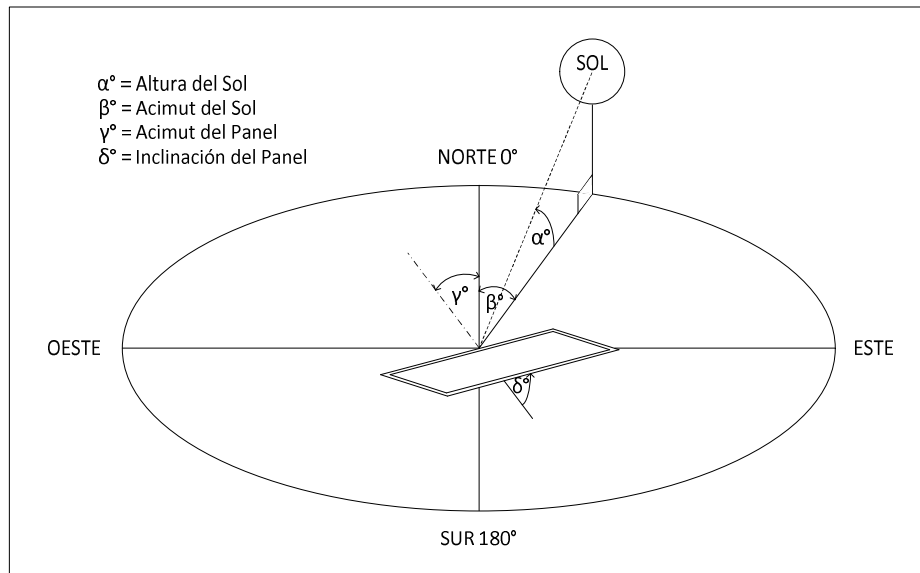


Figura 2.10. Detalle de posiciones del sol y panel con respecto a los puntos cardinales.

- Energía consumida o producida: la energía se mide en Kilowatt-hora y corresponde a la potencia de 1kW (equivalente a 3.600.000J) durante 1 hora.
- Hora solar peak: corresponde a la cantidad de energía por metro cuadrado que debería recibir el panel solar en condiciones de laboratorio (1000W/m²).

El sistema propuesto consiste en paneles solares que generarán la energía requerida por la carga, un banco de baterías que servirán para almacenar la energía generada por los paneles en caso de que no se consuma lo generado, un regulador de carga que mantendrá el nivel de voltaje para cargar las baterías y un inversor, encargado de suministrar la energía a la carga, además de convertir a corriente alterna la corriente continua entregada por las baterías. La carga corresponde a una bomba de agua con alimentación trifásica y un consumo de 30kW. Es posible visualizar el sistema en la figura. 2.11.

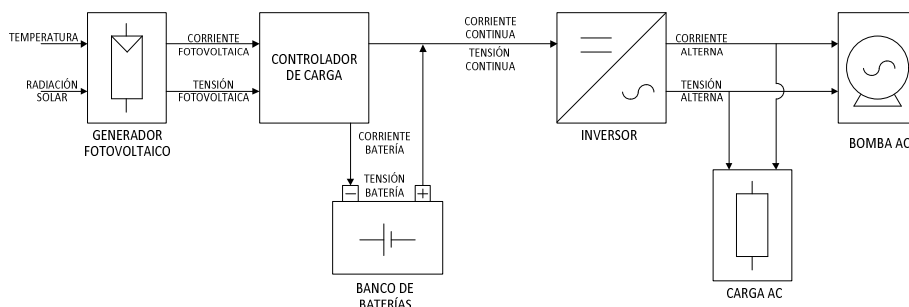


Figura 2.11. Sistema fotovoltaico detallado para la instalación en la viña.

Se elige un lugar dentro de la viña para la colocación de las estructuras y sus respectivos paneles, señalado en la figura 2.12 como “Instalación Fotovoltaica”. Como es posible apreciar en la imagen satelital y corroborado de forma presencial, en este sitio no existen obstáculos, que usualmente corresponde a árboles y edificaciones por sus dimensiones, que bloqueen el sol y puedan perjudicar la producción de energía eléctrica.

Las otras dos ubicaciones marcadas en la figura 2.12 corresponden a la “Sala de bombas”, lugar donde podemos encontrar los tableros eléctricos y las bombas que realizan el riego en la viña, y la “Estación base” del sistema de monitoreo, mencionada en párrafos anteriores.

Además de los componentes principales, se debe mencionar dentro de lo indispensable a los cables, tanto para corriente continua como alterna, las protecciones correspondientes al sistema y nivel de potencia y la estructura metálica de soporte de los paneles con el ángulo necesario.



Figura 2.12. Ubicación geográfica de la instalación fotovoltaica y otros puntos de la viña.

A continuación, se describen los equipos que forman el sistema fotovoltaico descrito en la figura 2.11, en los que están considerados los paneles solares, las baterías recargables, los reguladores de carga y los inversores DC/AC.

2.2.1. Paneles solares:

El material más utilizado corresponde al Silicio, el que es posible diferenciar de acuerdo con su proceso de cristalización y posterior ordenamiento estructural. Se puede encontrar mayoritariamente en el mercado de los paneles solares aquellos cuyas celdas están compuestas de silicio en su forma policristalina, con una eficiencia del 16-17% y monocristalina, con una eficiencia entre el 17 y 19%.

El fabricante de paneles fotovoltaicos asegura una potencia de salida de al menos 90% de la potencia máxima del módulo, al cumplir 10 años desde la puesta en marcha.

Los principales indicadores que deben tenerse en cuenta son la corriente de cortocircuito (I_{sc}), tensión de circuito abierto (V_{oc}), punto de máxima potencia (I_{mpp} , V_{mpp}) y la eficiencia y rendimiento (η).

I_{sc} hace referencia a la corriente máxima que genera el panel sin que haya cargas conectadas y sus terminales se encuentran cortocircuitados. V_{oc} es la tensión máxima que puede entregar el panel cuando no hay cargas conectadas y sus terminales se encuentran al aire. I_{mpp} y V_{mpp} son los puntos donde la potencia que entrega el panel solar es máxima. La curva I-V de los paneles fotovoltaicos se obtiene a partir de estos parámetros. La eficiencia y rendimiento corresponde a la comparación entre la potencia máxima que entrega el panel y la potencia resultante de la radiación solar que recibe el panel. Todos estos parámetros se obtienen de acuerdo con las condiciones estándar de prueba o STC de acuerdo con su acrónimo en inglés. El fabricante debe asegurar una potencia de salida de al menos 80% de la potencia máxima del módulo, al cumplir 25 años desde la puesta en marcha, según sus datos. La garantía debe cubrir al menos 10 años [14].

2.2.2. Regulador de Carga:

El regulador de carga es requerido en los sistemas aislados para mantener las baterías en buen estado y cargadas a un nivel de tensión adecuado, para que tengan la mayor duración posible. Para esto, el controlador de carga debe evitar que las baterías sean sobrecargadas y prevenir que haya un flujo inverso de la corriente. En la protección de sobrecarga, el regulador permite que las baterías sean completamente cargadas, una vez que esto ocurre, se bloqueará el paso de la corriente hacia las baterías. Si el regulador de carga no limita esta corriente, la batería podría verse severamente dañada. Este fenómeno puede ocurrir en la época de verano que es cuando las condiciones climáticas son más favorables y se puede generar más energía que la necesaria por el sistema.

Por otro lado, la llamada sobredescarga sucede cuando no hay suficiente energía para recargar la batería, pudiendo descargarse hasta niveles más allá de los permitidos. Para corregir este fenómeno, el regulador desconecta la carga, produciendo un circuito abierto cuando se alcanza el nivel mínimo permitido para la batería.

Los aspectos a tener en cuenta en la selección de un regulador de carga son la tensión de trabajo o tensión del sistema, la corriente máxima de entrada proveniente de los paneles y la corriente máxima de salida requerida según las características del inversor elegido.

Tipo de reguladores:

- Controlador On/Off (1 o 2 etapas): Es un tipo de regulador que desconecta los paneles fotovoltaicos cuando la batería alcanza cierto nivel de tensión. Cuando se habla de “1 etapa”, se refiere a que los paneles están directamente conectados a la batería sin un regulador de sobrecarga de batería. En “2 etapas”, se tienen 2 etapas para cargar la batería. En la primera etapa, la tensión crece por sobre el nivel de tensión del sistema (en un sistema de 12V, esta tensión puede ser del orden de 14,4 – 14,6V) y la corriente es máxima, obteniendo como resultado un estado de carga de la batería (SoC) de entre 80 y 90%. En la segunda etapa, la tensión comienza a disminuir (13,4 – 13,7V para un sistema de 12V), aproximándose con esto a un 100% de estado de carga. Es importante que la carga en esta etapa no sobrepase el nivel de autodescarga de la batería para que no se vea sobrecargada.

- Pulse-Width Modulation (PWM) o 3 etapas: estos cargadores usan un algoritmo de 3 etapas, que mantiene la tensión de la batería cercana al punto de regulación, de acuerdo con el ciclo de trabajo. El algoritmo de carga reduce la corriente para evitar que la batería se sobrecargue y se caliente, lo que produciría daños en la batería cuando la tensión alcanza el punto de regulación, sin embargo, continúa entregando la máxima cantidad de energía en el tiempo más corto posible. Para lograr esto, se requiere controlar electrónicamente los pulsos de corriente provenientes de los paneles solares y así lograr la variación en el ancho y el tiempo de éstos para regular el flujo de carga. Con este tipo de controlador, el nivel de carga de la batería se mantiene a 90-95%. El PWM es un controlador barato, ha sido usado durante mucho tiempo y se puede encontrar en distintos tamaños.
- Seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT): si bien corresponde a un PWM, usualmente se le denomina como MPPT para hacer la diferencia entre ambos controladores. Este tipo de regulador de carga es capaz de ajustar las condiciones para mantener la carga de baterías al máximo. Para esto, utiliza el exceso de tensión producida por los paneles solares para aumentar la corriente y así, lograr una carga más rápida de la batería. El algoritmo utilizado es capaz de comparar la tensión del arreglo fotovoltaico con la tensión de la batería y así calcula la potencia óptima que puede producir el sistema solar para cargar la batería, lo que es ideal para los cambios en la producción de energía debido a la variabilidad de las condiciones climáticas. El MPPT puede alcanzar una eficiencia en la conversión de energía de 93 – 97%, con lo que puede obtener 20 – 45% más de energía en verano y 10 – 15% en invierno, pero también es un controlador más caro [14].

2.2.3. Baterías:

Las baterías en el sistema fotovoltaico aislado tienen múltiples utilidades, permiten almacenar la energía para ser utilizada por las noches, compensar las variaciones que pueda sufrir la generación de energía por parte de los paneles solares debido principalmente a las variaciones en la radiación solar o días nublados, mantener estable la tensión para que el sistema funcione de manera normal.

Para el caso de la batería, si es del tipo de Plomo-ácido no sellada, debe controlarse el nivel del líquido una vez al año. Además, se debe evitar que los bornes de conexión se sulfaten.

Hay que instalar la batería en lugares suficientemente sombreados y ventilados.

Las baterías se pueden dividir en 4 grupos:

- Baterías monoblock: son utilizadas en pequeñas instalaciones y para consumos que no sean diarios.
- Baterías AGM (Absorption Glass Mat): no necesitan mantenimiento y tienen un menor número de ciclos que el resto. Tienen una gran profundidad de descarga. Resistentes a los choques y vibraciones.
- Baterías estacionarias: al igual que las AGM, no necesitan mantención, pero tienen una vida útil mucho mayor, por lo que se recomienda para usos diarios esperando gran durabilidad.
- Baterías de Litio: este tipo de baterías son mejores que las anteriores en casi todos los aspectos, son más pequeñas y ocupan menos espacio, no necesitan mantención y pueden descargarse completamente sin ser afectadas, a la vez que requieren menos tiempo de carga, aunque su elevado costo supone un gran problema.

Los criterios usados para la selección de la batería son los siguientes:

- Voltaje nominal: existen distintos valores para el voltaje de la batería, sin embargo, este debe coincidir con el nivel de tensión de entrada en el inversor. En caso de que los valores de voltaje no coincidan y no se tenga otra opción viable, es posible modificar el arreglo de baterías, en este caso la cantidad de baterías en serie, para lograr la tensión deseada. Por ejemplo, 2 baterías de 12 V conectadas en serie, entregarán la misma cantidad de Ampere-hora, pero la tensión será de 24 V.
- Días de Autonomía: se refiere a la cantidad de días sin generación fotovoltaica que el conjunto de baterías es capaz de alimentar el sistema. Considerar una gran cantidad de días de autonomía aumentarán la cantidad de baterías necesarias.

- Capacidad de la batería: en otras palabras, es la cantidad de Ampere-hora que es capaz de entregar la batería, a tensión constante. Con este dato es posible obtener la cantidad de energía que es capaz de suministrar al sistema.

Antes de seleccionar el tipo de batería adecuada para el proyecto, es necesario tener en cuenta la capacidad nominal, el estado de carga, el régimen de carga (o descarga), la eficiencia y la vida útil de la batería. Las baterías de ciclo profundo tienen una vida útil aproximada de 3 a 5 años, por lo que será necesario tener en cuenta el reemplazo periódico de éstas para que el sistema de alimentación funcione correctamente. Otro aspecto importante es mantener descargas controladas de la batería y que éstas no se descarguen completamente, lo que afecta negativa e irreversiblemente su capacidad. Es por esto que lo recomendado es que las baterías sólo se descarguen hasta un 60 – 85% de su capacidad total y sean diariamente recargadas para ser utilizadas al día siguiente.

Si la batería tiene un SoC (State of Charge) nivel de carga bajo, se genera un acortamiento en la vida útil de la batería.

Las baterías son puestas en serie para aumentar su voltaje nominal y puestas en paralelo para aumentar su capacidad Ah o simplemente para aumentar la corriente que pueden transmitir. Los días de autonomía de las baterías corresponden a los días con baja o nula insolación, lo que no permite la generación de energía eléctrica por parte del sistema fotovoltaico. Depende de las condiciones climáticas del lugar de instalación y del criterio del diseñador.

La profundidad de descarga (DoD) es también una variable para considerar al momento de elegir las baterías y corresponde al porcentaje de la batería que es destinada a cubrir la demanda de energía por parte de la carga. Oscila entre los valores de 60 y 80%. [14]

2.2.4. Inversor:

El inversor es un dispositivo capaz de transformar tensiones continuas usualmente del orden de los 12, 24 o 48V provenientes de un arreglo fotovoltaico o baterías, en tensión alterna de 120/220V, que es el modo más común de alimentación de equipos eléctricos.

Para realizar el cambio de potencia continua a alterna, lo más común es utilizar elementos electrónicos, como transistores. Los más utilizados son MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), los cuáles son utilizados generalmente en aplicaciones

de 1 a 10kW e IGBT (insulated gate bipolar transistor), usados en aplicaciones que pueden exceder los 100kW.

Es usado tanto para los sistemas conectados a la red como los aislados. En los sistemas conectados a la red, el inversor sirve también para regular la generación solar por parte de los paneles solares, utilizando el algoritmo MPPT para obtener la mayor cantidad de energía posible en cada instante. Para sistemas aislados, el inversor es conectado a baterías directamente o a través de un regulador de carga por el lado de potencia continua y entrega un correcto nivel de tensión y frecuencia por el lado de alterna.

Es posible catalogar los inversores de acuerdo con la forma de la onda de salida, el tamaño y las aplicaciones:

- Onda cuadrada: es la versión más “rústica” del inversor, donde tiene una señal plana negativa por medio ciclo y luego salta hasta el valor positivo, se mantiene por medio ciclo y se repite el proceso. Este tipo de inversores no posee una regulación de la tensión de salida y es propenso a generar armónicas.
- Onda sinusoidal modificada: este tipo de inversores produce una onda que no es completamente cuadrada ni logra el resultado de una puramente sinusoidal, produce una menor cantidad de armónicos que su similar de onda cuadrada, pero produce ruido que puede interferir con radios o televisiones. No es recomendable utilizarlos para alimentar motores, sin embargo, son la opción más utilizada para soluciones aisladas, por ser más simples y baratos que los inversores de onda sinusoidal.
- Onda sinusoidal: estos inversores pueden ser utilizados para alimentar cualquier tipo de carga de corriente alterna, gracias a que en la salida alterna generan una onda muy similar a una sinusoidal pura. Además, tienen la capacidad de apagarse o prenderse de acuerdo con las variaciones de la carga, lo que permite ahorrar carga de las baterías, pueden tener un peak de eficiencia cercana al 90%, poseen muy bajas distorsiones armónicas por lo que sirven para soluciones que contengan electrónica sensible y debido a su capacidad de soportar corrientes de arranque, los inversores pueden ser utilizados en soluciones asociadas a la alimentación de motores.

Finalmente, para la elección de un inversor es necesario tener en cuenta que las pérdidas sean pequeñas cuando no se encuentren en uso, la eficiencia sea alta para maximizar la potencia de salida del inversor, la capacidad para soportar corrientes de arranque sea alta (para soluciones que contengan motores) y posea una baja distorsión armónica.

Los fabricantes recomiendan sobredimensionar en un 20 o 30% la capacidad del inversor con respecto a la carga que alimentará [14].

Capítulo 3: Implementación del sistema de riego inteligente con energía fotovoltaica

En los capítulos anteriores se mencionaron las diferentes dificultades que se han presentado en la viña durante los últimos años y se detallaron las soluciones que podrían implementarse y los componentes asociados para la red de monitoreo y la generación de energía eléctrica. En este tercer capítulo, se analizará el funcionamiento del sistema, simulando el comportamiento de la red inalámbrica a través de OPNET Modeler para luego instalar en terreno un prototipo y así evaluar la comunicación efectiva a través de las mediciones obtenidas. En cuanto al sistema fotovoltaico para la alimentación de la bomba, se utiliza PVSYST, un software de modelado de distintos escenarios fotovoltaicos y así proponer la mejor solución para la viña. Finalmente, se realizará el análisis económico del proyecto.

3.1. Dimensionamiento de Sistema Fotovoltaico

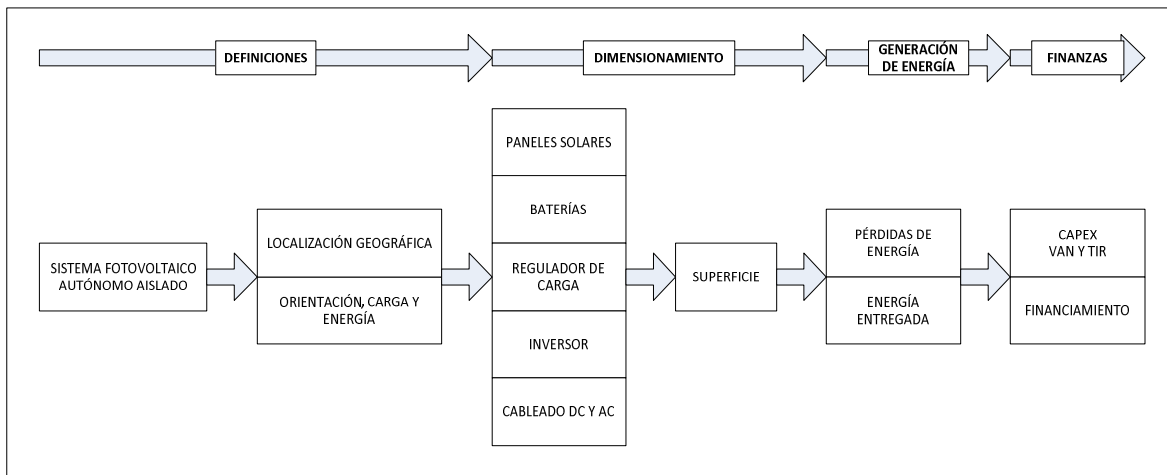


Figura 3.1. Diagrama de flujo del dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

3.1.1. Ubicación y orientación:

Se eligió un terreno baldío ubicado a 120 metros de distancia aproximadamente desde la caseta de bombeo, por no contar con obstáculos, construcciones o árboles que pudieran bloquear el sol en algún momento del día, como es posible apreciar en la figura 3.2. La

inclinación de los paneles será de 23° con los paneles direccionados hacia el norte (acimut 0°), de esta forma se logra captar una mayor cantidad de energía durante los meses de verano, coincidiendo con la mayor demanda de energía por parte de la bomba de regadío.

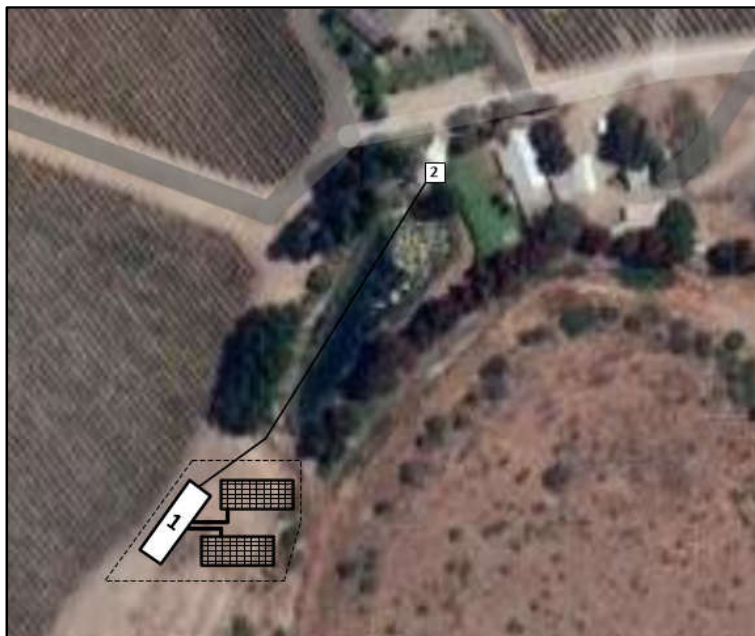


Figura 3.2 Localización de la instalación fotovoltaica.

Desde los paneles al punto 1 el cableado se realizará con conduit galvanizado o C.A.G. sobrepuesta en el terreno. El punto 1 corresponde al lugar donde se ubicarán las baterías, los reguladores de carga y los inversores para transmitir la energía eléctrica con líneas de corriente alterna en conduit PVC enterrado hasta llegar al punto 2, donde se encuentra la sala de bombas y los tableros.

3.1.2. Consumo de Energía Estimado:

Es posible conocer el consumo de energía eléctrica con la información facilitada por la viña a través de dos documentos Excel, uno llamado “Registro de Riego 2018-2019 Santa Isabel Plan.xlsx” donde se registran las horas de funcionamiento de la bomba de agua e “Indicadores Sustentables VCB.xlsx” con el consumo eléctrico de los medidores de la viña, específicamente el medidor 450-2. Conociendo estos datos, se generó un archivo con extensión csv definiendo así las Necesidades del Usuario, para el análisis en PVSYST, asignando la potencia de la bomba (30kW) durante las horas de riego especificadas.

En la figura 3.3 se aprecia el consumo de energía de la bomba de agua. Durante este período (octubre 2018 a septiembre 2019) se consumió 13,2MWh, con un costo para la viña de 72\$/kWh aproximado.

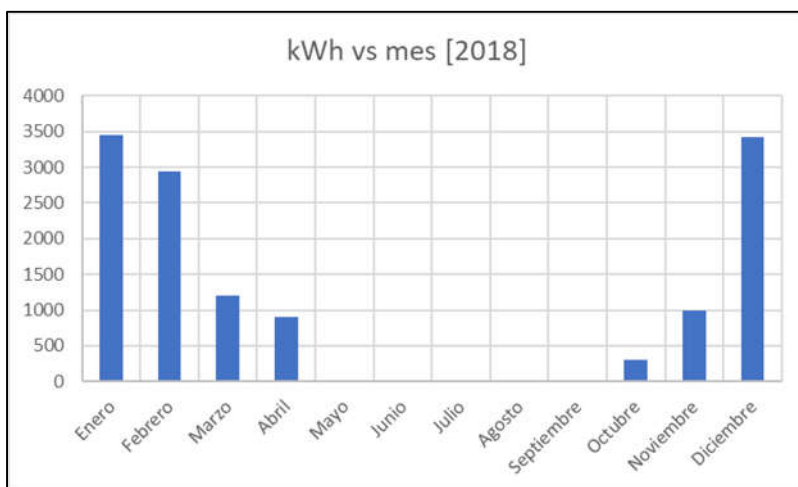


Figura 3.3 Distribución del consumo de energía de la bomba 1.

3.1.3. Baterías

El sistema fotovoltaico se dimensiona con 10 días de autonomía para las baterías, con lo que se busca darle robustez al sistema en caso de que las condiciones climáticas no permitan generar la suficiente energía para recargar las baterías. Esto hace referencia a los días en que el sistema no recibirá luz solar suficiente para generar electricidad. Teniendo esto en cuenta, el software es capaz de calcular la cantidad de baterías necesarias para tres casos distintos de autonomía: conservador (10 días de autonomía), medio (5 días de autonomía) y riesgoso (1 día de autonomía) (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1: Características Batería Pb-Ácido

Baterías PB-ácido selladas Rolls				
Dispositivo	Cantidad (mínima)	Tensión Batería/global	Capacidad Sugerida	Autonomía
S12-290 AGM	80 (4x20)	12/48 V	2894Ah	1 día
S12-290 AGM	256 (4x64)	12/48 V	14469Ah	5 días
S12-290 AGM	496 (4x124)	12/48 V	29016Ah	10 días



Figura 3.4. Batería S12-290 AGM.

3.1.4. Paneles Fotovoltaicos

A continuación, es el turno de elegir los paneles solares que será utilizados. Se selecciona CS6P-250P de 250W y fabricante Canadian-Solar. Sus características más importantes se detallan en la tabla 3.2. Estos valores serán requeridos al momento de dimensionar el Regulador de Carga y fueron obtenidos directamente de la hoja de datos de los módulos, y que se encuentra adjunta en el anexo. Se eligieron cadenas de 20 paneles y 6 de estas cadenas serán utilizadas para lograr una potencia de 30,0kW y una potencia nominal de 27,22kW (ver Anexo B).

Tabla 3.2. Características Módulo fotovoltaico

Módulo fotovoltaico Canadian-Solar						
Dispositivo	Paneles en Serie	Paneles en Paralelo	Eficiencia %	Potencia W	Voc/Vmpp V	I _{sc} /I _{mp} A
CS6P-250P	20	6	15,54	250	37.2/30,1	8,87/8,30



Figura 3.5. Panel Solar 250W Canadian-Solar.

Definida la cantidad de paneles, se analiza las sombras que afectarán los paneles, considerando que la distancia entre las estructuras debe ser 6,5m, de acuerdo con los cálculos obtenidos y así se simula el sombreado en PVSYST como se observa en la figura 3.6.

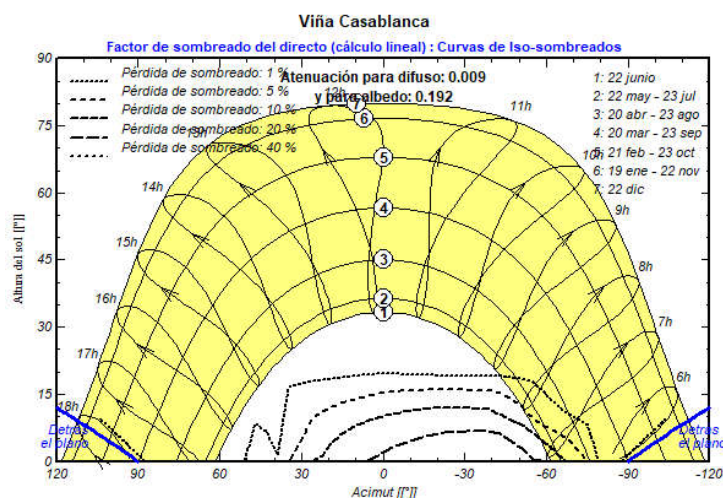


Figura 3.6. Sombreado de paneles durante el año.

De acuerdo con la gráfica obtenida, la estructura ubicada más al norte genera sombra sobre los paneles de la siguiente estructura, sin embargo, no afectan en mayor medida a la producción, porque ocurren durante el invierno, en un horario donde no hay mayor producción de energía y en ninguno de los casos a estudiar, el sistema sufre una sobrecarga durante el invierno, por lo que no se vuelve un inconveniente el que se presenten estas sombras y estas pérdidas. Otro punto por mencionar corresponde a lo que ocurre durante los meses de verano, al amanecer y atardecer, el sol se encontrará por detrás de los paneles, lo que se traduce en 0 producción, aunque tampoco es relevante para la producción por ser períodos cortos de tiempo.

Los paneles serán instalados en sentido horizontal en una estructura metálica, de esta forma se hace más estable y no presenta problemas con la ocurrencia de viento.

Dos estructuras metálicas, como las mostradas en la figura 3.7, serán las encargadas de sostener los 3 arreglos por estructura, con un total de 60 paneles en cada estructura. Se construirá una base de hormigón, y el resto de la estructura debe ser de acero galvanizado, y en terreno sólo se armará, por lo tanto, cada tramo debe venir con las perforaciones hechas y con pintura antioxidante.

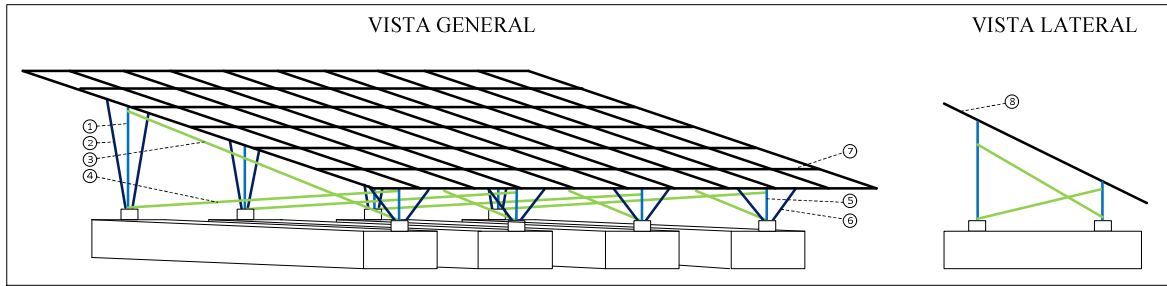


Figura 3.7. Estructura de soporte para instalación fotovoltaica desde distintas vistas.

3.1.5. Regulador de Carga

Para el control de la energía saliente desde los paneles solares y su posterior carga de las baterías, se debe seleccionar el regulador de carga. El regulador de carga elegido será el VarioString VS-120 MPPT. Este regulador tiene dos tipos de conexión y permite que la tensión máxima aceptada de entrada desde los paneles fotovoltaicos alcance desde los 600 a 900V_{dc}, flexibilizando las posibilidades y permitiendo conectar una mayor cantidad de paneles en serie. En la simulación se utiliza la opción de 900V_{dc}, lo que permite conectar más módulos fotovoltaicos en serie. En la tabla 3.3 se muestran las características más importantes del Regulador.

Tabla 3.3. Características del regulador de carga.

Regulador de Carga VarioString					
Dispositivo	Cantidad	Eficiencia	P _{nom} /P _{max} (STC) W	V _{bat} /V _{in} V _{dc}	I _{carga} A
VS-120 MPPT	6	>98 %	5000 / 7000	48 / 900	120



Figura 3.8. Regulador de carga Variostring VS-120.

Para la conexión de cada string se designó un regulador de carga exclusivo, por la cantidad de paneles conectados en serie y la potencia que entregan.

3.1.6. Inversores AC/DC

Considerando que el sistema debe entregar una potencia final trifásica alterna a la bomba, se debe dimensionar un inversor que permita acoplarse a las baterías y al regulador de carga. Para esto, se utiliza un inversor que pueda acoplarse al regulador de carga previamente seleccionado, por lo que se elige el Inversor de la familia XTENDER XTH 8000-48 (ver tabla 3.4).

Tabla 3.4. Características del Inversor.

Inversor XTENDER					
Dispositivo	Cantidad	Rendimiento	P_{nom}/P_{max} VA	$V_{bat} V_{dc} / V_{out} V_{ac}$	$I_{carga} A_{dc} / I_{out} A_{ac}$
XTH 8000-48	6	96 %	7000 / 21000	48 / 230	120 / 80

- Si bien, este inversor entrega una tensión alterna monofásica, existe la posibilidad de conectar entre sí 3 inversores (iguales) con el fin de obtener alimentación trifásica. Por esta razón y por la capacidad de cada inversor es que se decide utilizar 6 de éstos, de manera tal que se tendrá una alimentación de 380V trifásicos a la salida de los

inversores y la capacidad de manejar potencias de hasta 42kVA nominales de manera continua y 126kVA máximos por 5 segundos.

- A través de un bus de comunicación propietario de longitud máxima de 5 metros, los inversores son capaces de conectarse entre ellos, intercambiando datos, configuraciones y actualizaciones, esto también incluye la sincronización para generar cada una de las 3 fases del sistema trifásico. Con la ayuda del control remoto RCC-02/-03 es posible poner en marcha estos equipos.
- La configuración por defecto del inversor lo habilita para ser utilizado con baterías de plomo, pero puede ser reprogramado para utilizar baterías de Ni-CD o Li-ion, bajo responsabilidad del instalador. Para mayor información sobre el conexionado de los inversores ver Anexo B.



Figura 3.9. Inversor Xtender XTH-8000-48.

- Fusibles: este dispositivo previene que alguna sobre corriente del sistema pueda causar algún daño en los paneles.

Tabla 3.5. Características del Fusible.

Modelo	Fabricante	Corriente A	Tensión Vcc
PV-15A10F	EATON	15	1000
PV-200A-2XL	EATON	200	1000

- Varistor: todos los equipos deben estar conectados a tierra de acuerdo con lo señalado en la documentación del fabricante.

Tabla 3.6. Características del Fusible.

Modelo	Fabricante	Corriente kA	Tensión V _{cc}	Tiempo de respuesta ns
BSPH31000YPV	EATON	40	1000	≤ 25

- Interruptor Automático:

Tabla 3.7. Características del Interruptor.

Modelo	Fabricante	Cantidad de Polos	Corriente Nominal	Capacidad de interrupción	Curva
C120N-2P 80A	Schneider	2	80A	6kA	C
C120N-4P 80A	Schneider	4	80A	6kA	C

- Protección Diferencial:

Tabla 3.8. Características de la protección diferencial.

Modelo	Fabricante	Corriente	Corriente	Curva
ACTI 9 IID 2P 230V	Schneider	80A	30 mA	AC

- Cableado: El cableado en CC comprende los siguientes tramos: paneles hacia reguladores, reguladores hacia baterías y baterías hacia inversor. El cableado en CA corresponde a la conexión entre el inversor y el panel eléctrico de la bomba de regadío.

El detalle de los cableados se muestra en las tablas 3.9 y 3.10 y el dimensionado se realiza según lo indicado en la norma chilena eléctrica Nch 4/2003.

La canalización se dimensiona para que cumpla con lo establecido en la Norma 4/2003 y en la Normativa RGR N°2 SEC con respecto al máximo de conductores por ducto.

Tabla 3.9. Detalles Cableado DC

Cableado DC	Panel-Regulador		Regulador-Batería	Batería-Inversor
Largo	20 m	2 m	2 m	2 m
Superficie	4 mm ²	6 mm ²	50 mm ²	95 mm ²
Canalización	1/2" C.A.G.	1/2" C.A.G.	1" PVC	1 1/2" PVC

Tabla 3.10. Detalles Cableado AC

Cableado AC	Inversor-Sala de Bombas
Largo	120 m
Superficie	50 mm ²
Canalización	1 1/2" PVC

- Malla a Tierra: se diseña una malla a tierra para la instalación fotovoltaica. Se utiliza cable de cobre desnudo 2/0 para el armado de la malla y las barras.

La malla se encuentra a 0.6m de profundidad y las barras están enterradas a 0.7m de profundidad a partir de la posición de la malla (ver figura 3.10). El reticulado de 36x24m² se compone de 25 conductores de tierra y 28 barras enterradas con un costo aproximado de \$789.993.

Este diseño es simulado y validado a través del software ETAP

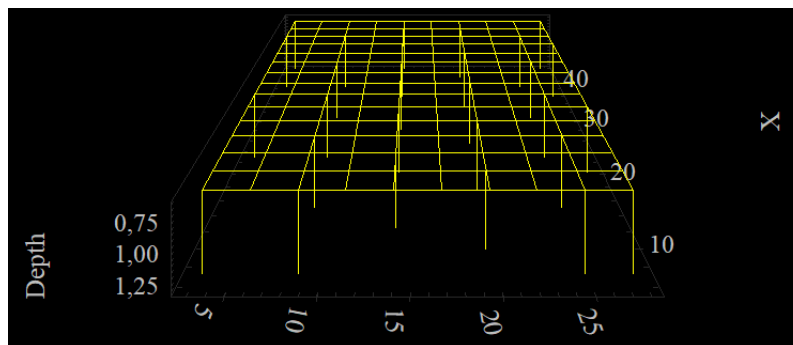


Figura 3.10. Reticulado de malla puesta a tierra simulado en ETAP 12.6

3.1.7. Diagrama Unilineal.

Una vez que se ha dimensionado el sistema fotovoltaico, se genera el diagrama unilineal representando las conexiones eléctricas entre los aparatos del sistema (ver figura 3.11).

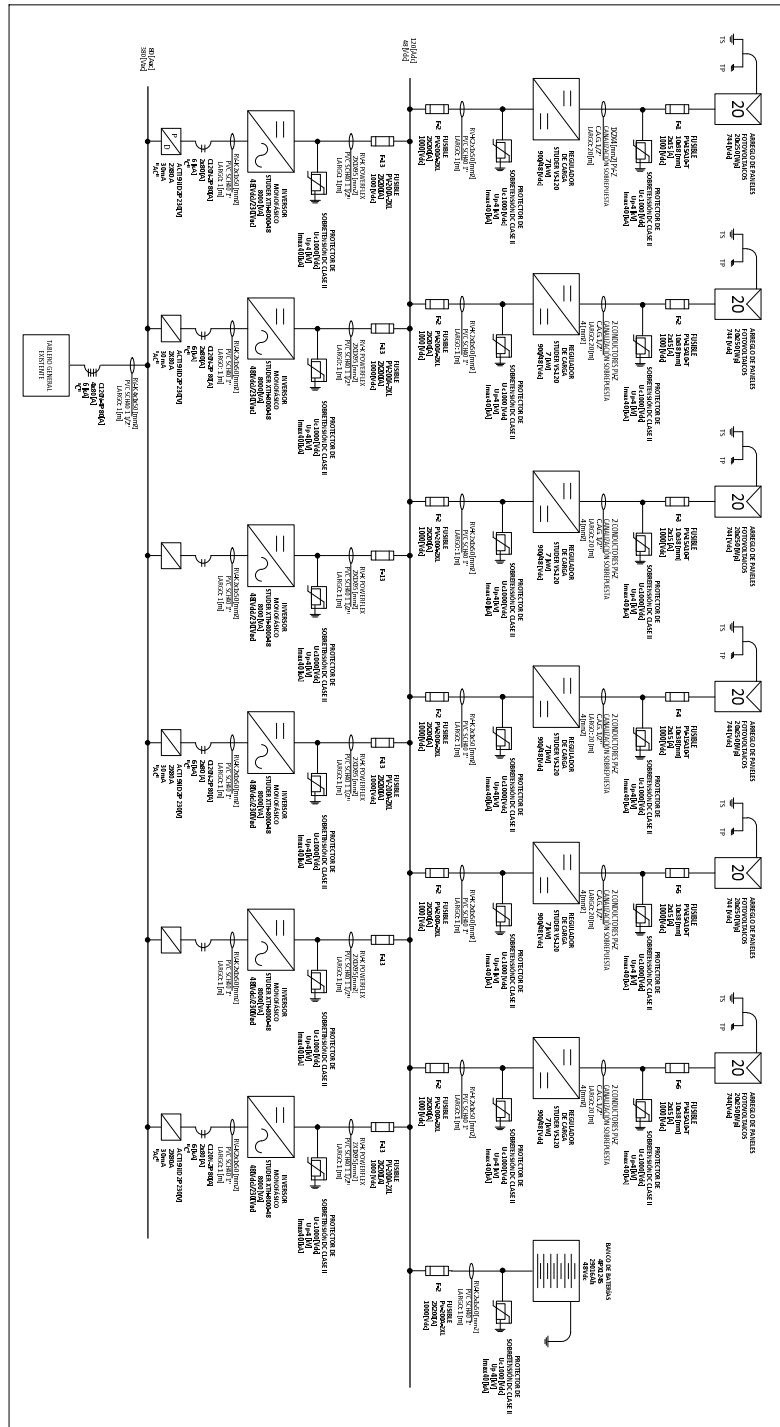


Figura 3.11. Diagrama unilineal del sistema fotovoltaico

3.2. Resultados FV

Se analizan 3 casos distintos tipos de carga en el software PVSYST. El caso 1 sólo contempla la carga en base a la bomba de regadío, en el caso 2 y 3 se añade una carga externa que será representada a través de calefactores, durante los meses de invierno [15].

Se considera un 7% de pérdidas por acción del inversor y las pérdidas de tensión por transmisión de la energía, para cubrir la demanda de la bomba.

- Caso 1: Bomba 30kW. Este es el caso original en la viña, con el funcionamiento de la bomba de agua entre los meses de octubre y abril, utilizando una instalación fotovoltaica de 30kWp.
- Caso 2: Bomba 30kW + Calefactor 3kW. Este caso corresponde al original en la viña, pero se le añade una carga durante los meses de mayo y septiembre correspondiente a un calefactor de 3kW instalado en el sector de las oficinas.
- Caso 3: Bomba 30kW + Calefactor 6kW. Se sigue la misma lógica del caso anterior, utilizando esta vez el doble de la carga para calefacción.

La energía que no es usada debido a que el conjunto de baterías se encuentra totalmente cargado, es la causa más importante de pérdidas en el sistema, abarcando entre el 60,1%, en el peor caso y el 38,6% de la generación anual en el mejor caso, ver tabla 3.11. Esto ocurre porque se ha sobredimensionado el conjunto de baterías y la carga no es lo suficientemente constante durante el año.

El primer caso es el peor en consumo de energía. La carga sólo está compuesta por la bomba de agua y durante el invierno no hay consumo, entonces las pérdidas se elevan. Como los tres casos parten de la misma base de generación, sólo cambia el comportamiento de la carga y se logra un mejor uso de la energía, donde el factor de rendimiento sube desde un 29,6% hasta un 46,97% en el caso de calefactores conectados de 6kW.

La energía que no se utiliza durante el invierno, puede servir para la alimentar calefactores o ventiladores que ayudan a combatir las heladas. Cuando las temperaturas se acercan a 0°C o bajo cero, los molinos dispuestos para combatir estas heladas no son suficientes, por lo que se recurre a calefactores, logrando así no sólo circulación de aire a través del movimiento de las hélices, sino que también un aumento en la temperatura del aire en movimiento.

En las figuras 3.12 a, b y c, se aprecia el cambio que experimenta la generación de energía en cuanto se añaden cargas durante la época de invierno, con un mes de junio donde casi se consume toda la energía que ha sido producida.

Tabla 3.11 Simulaciones de Energía Fotovoltaica

Sistema Fotovoltaico	Energía Disponible Anualmente	Factor de Rendimiento PR	Pérdidas Batería Anualmente	Consumo MWh/año		
				Directo	Baterías	Total
Caso 1	39,35 MWh	29,60 %	30,86 MWh	4,12 (30,9%)	9,22 (69,1%)	13,34 (25,98%)
Caso 2	39,10 MWh	38,25 %	25,0 MWh	5,53 (32,1%)	11,71 (67,9%)	17,24 (33,58%)
Caso 3	38,97 MWh	46,97 %	19,82 MWh	7,47 (35,3%)	13,69 (64,7%)	21,16 (41,22%)

La figura 3.13 muestra las pérdidas ocasionadas por los distintos componentes y características del sistema, como por ejemplo las pérdidas por temperaturas elevadas en los paneles o las sombras (casi nulas) que afectan a los paneles que se encuentran más al sur en la instalación.

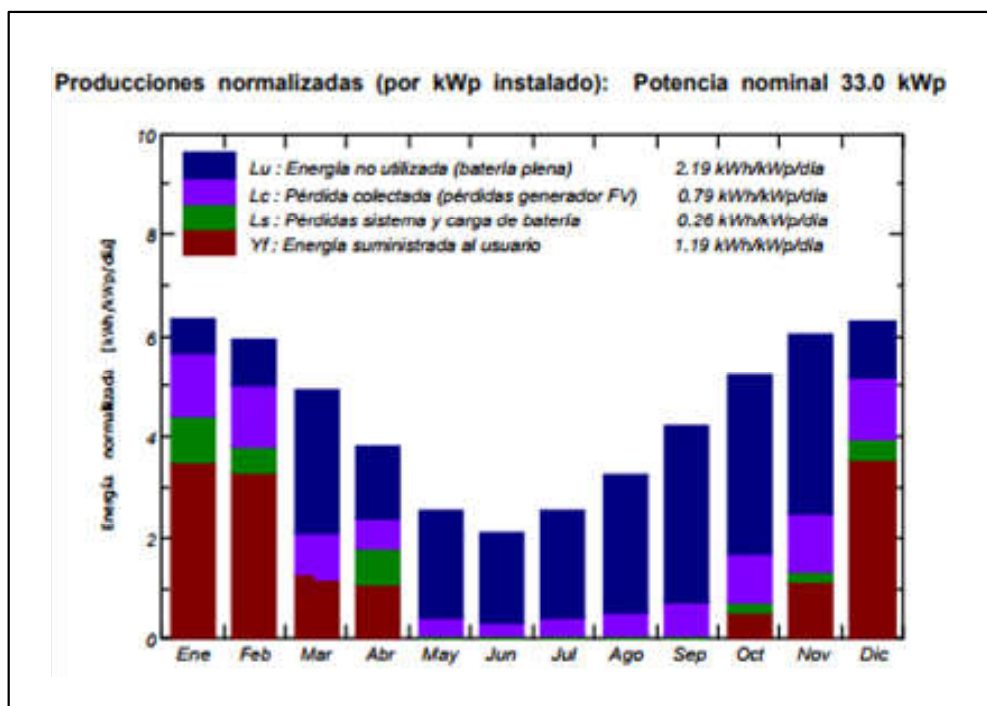


Figura 3.12 a). Caso 1: Producción fotovoltaica y pérdidas asociadas.

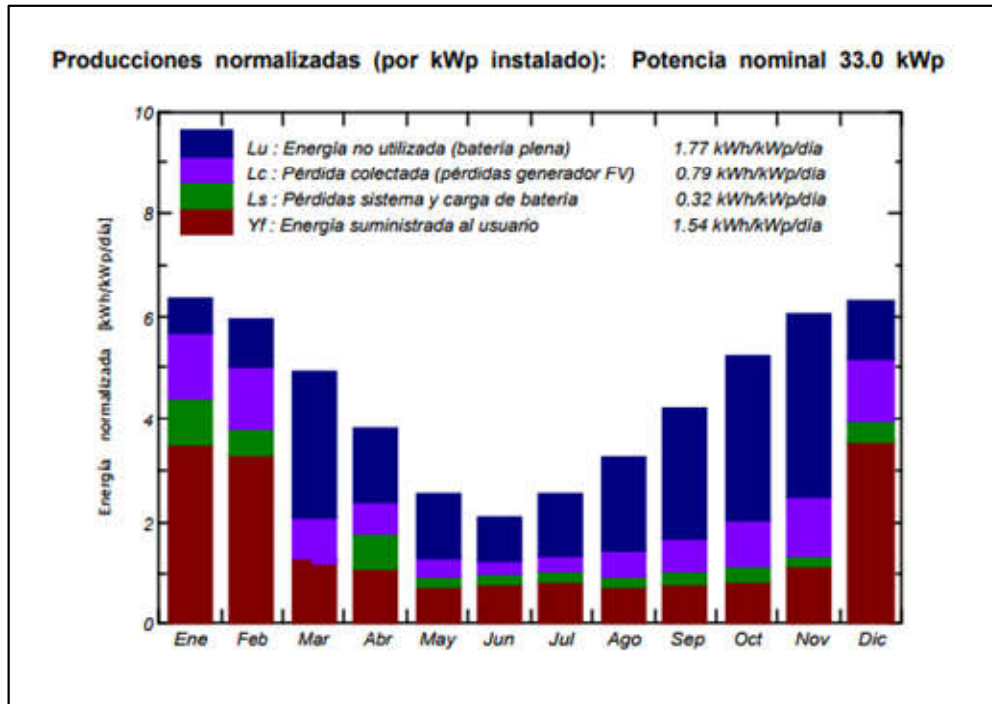


Figura 3.12 b). Caso 2: Producción fotovoltaica y pérdidas asociadas.

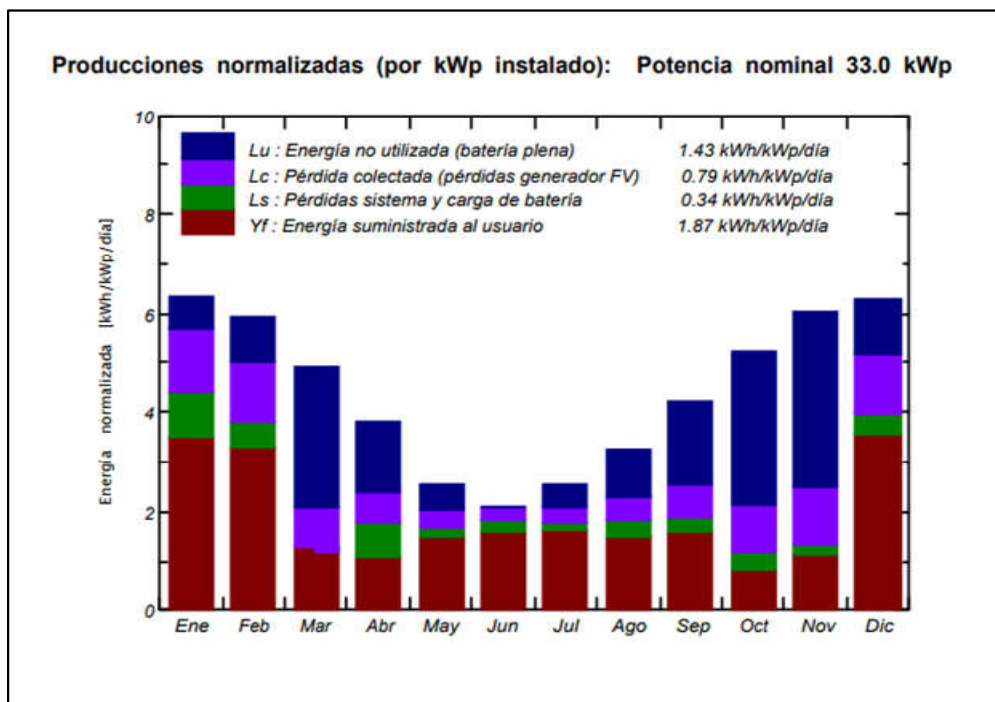


Figura 3.12 c). Caso 3: Producción fotovoltaica y pérdidas asociadas.

3.3. Simulación WSN

3.3.1. Red de Sensores Inalámbricos:

La red de monitoreo de la viña será evaluada mediante simulaciones con la ayuda del software OPNET Modeler. OPNET es una herramienta de simulación y modelación de redes. A través de ésta es posible revisar y desarrollar distintos tipos de situaciones de acuerdo con las necesidades, permitiendo la creación de modelos y analizar la información resultante. En este programa se eligen distintos tipos de comunicación para comparar sus desempeños, en particular se usarán Ethernet (cableado), Wi-Fi y Zigbee (inalámbrico). Algunas características de estas comunicaciones se detallan en la tabla 3.12 [16].

Tabla 3.12 Características de los tipos de comunicación.

Tipo de comunicación	Distancia de Transmisión [m]	Tipo de Red	Standard	Velocidad de transmisión
Ethernet	Hasta 100 m	Cableada	IEEE 802.3	100 Mbps
Wi-Fi	Hasta 100 m	Inalámbrica	IEEE 802.11g	54 Mbps
Zigbee	100 – 1600 m	Inalámbrica	IEEE 802.15.4	250 kbps

3.3.2. Casos de estudio.

Para analizar el comportamiento de la red de sensores, se determinó utilizar dos métodos distintos: uno corresponde a una simulación de la red y el otro es un prototipo probado en terreno. En cada uno de estos casos, a su vez, se evaluarán los 3 tipos de comunicación mencionados previamente, el retraso que sufren al enviar las señales, los tamaños de las distintas señales incluidas y los costos de los componentes.

3.3.3. Definición de parámetros.

Para la simulación se genera un campo con las mismas dimensiones de Maitén 1A y se ubica la estación base en las oficinas de la viña, a un costado del terreno elegido. Se estudia primero el caso del prototipo y luego el monitoreo de todo el terreno.

El prototipo se compone de un nodo, construido por una placa ESP8266 y 3 sensores. Este nodo se encuentra a 85 metros de distancia desde la estación base, como se puede apreciar en la figura 3.14, delimitando esta distancia máxima por una circunferencia. Esta distancia

fue designada porque es la máxima distancia de transmisión de datos desde el nodo de medición hasta la estación base, usando Wi-Fi como comunicación y que corresponde al caso de estudio en terreno.

Tabla 3.13 Sensores

Tipo de Sensor	Datos transmitidos	Unidad	Valores
Humedad del Suelo	100 bytes/s	[%]	0-100
Temperatura Ambiente	2 bytes/s	[°C]	-4 to 65
Humedad Ambiente	2 bytes/s	[%]	0-100

3.3.4. Simulaciones

En cada una de las arquitecturas propuestas, se encuentran distintas características que son simuladas a través de OPNET.

En una arquitectura basada en la comunicación por cable ethernet, todos los sensores tienen su propia conexión directa con el switch ethernet, que recolecta los datos de los sensores. La comunicación entre el switch y el servidor ethernet es configurada con la misma capacidad de transmisión, 100 Mbps.

Para la arquitectura basada en Wi-Fi, todos los sensores son configurados de manera que se comuniquen y envíen directamente la información hacia el servidor de manera inalámbrica. La arquitectura basada en Zigbee es muy parecida a la arquitectura Wi-Fi, sin embargo, en Zigbee se utilizan dos dispositivos diferentes: un coordinador y dispositivos finales (end devices)

Tabla 3.13 Modelo de nodo utilizado para la simulación OPNET

Nombre	Ethernet	Wi-Fi	Zigbee
Nodo de sensor	ethernet_wkstn_adv	wlan_wkstn_adv	Zigbee_End_Device
Unidad de recopilación de datos	ethernet64_switch	wlan_ethernet_slip4_adv	Zigbee_Coordinator
Controlador local	ethernet_server	wlan_server model	

- **Prototipo**

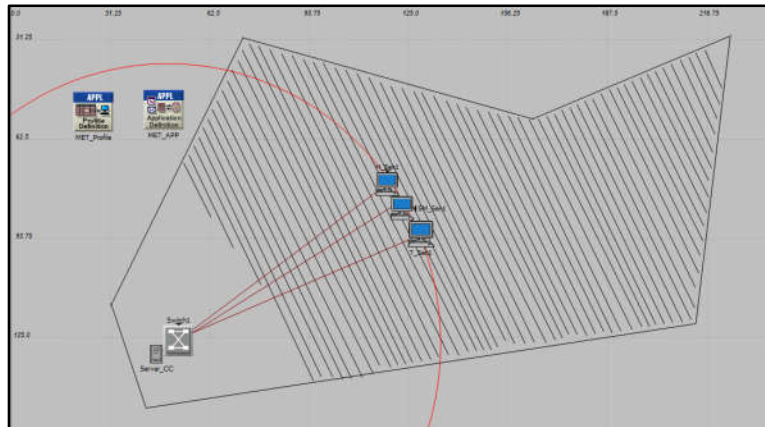


Figura 3.14 a) Simulación del prototipo con comunicación Ethernet

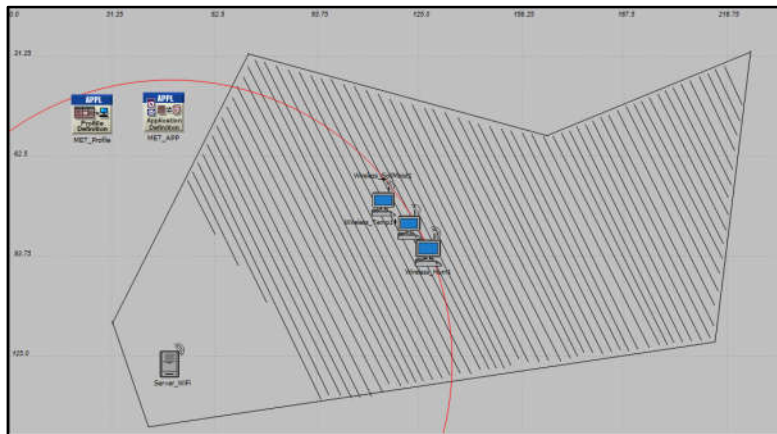


Figura 3.14 b) Simulación del prototipo con comunicación Wi-Fi

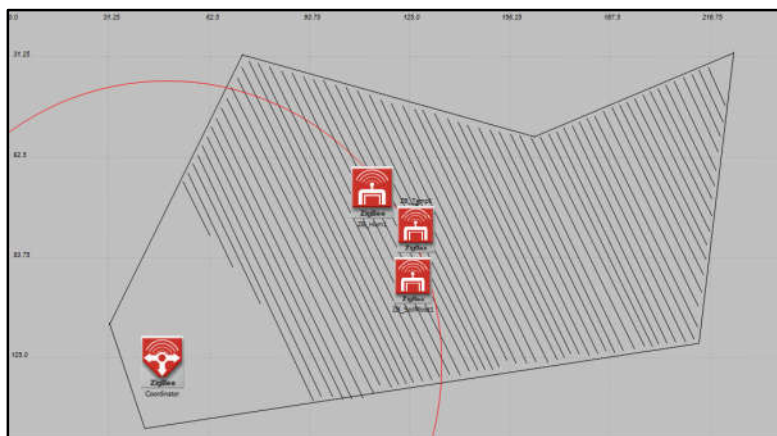


Figura 3.14 c) Simulación del prototipo con comunicación Zigbee

- **Caso Completo**

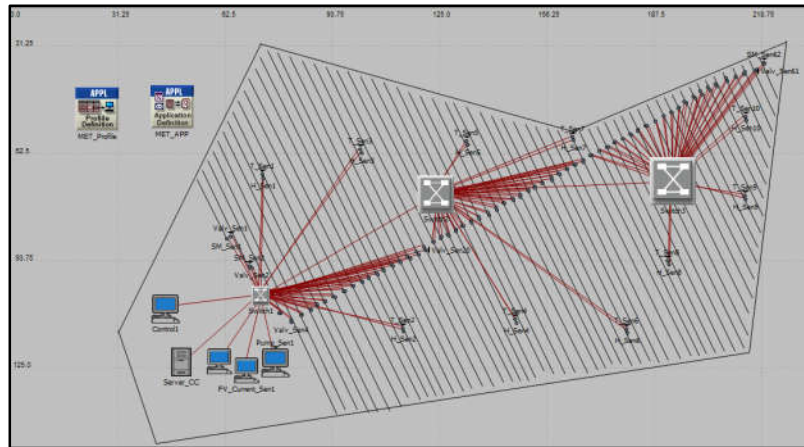


Figura 3.15 a) Simulación del caso completo con comunicación Ethernet.

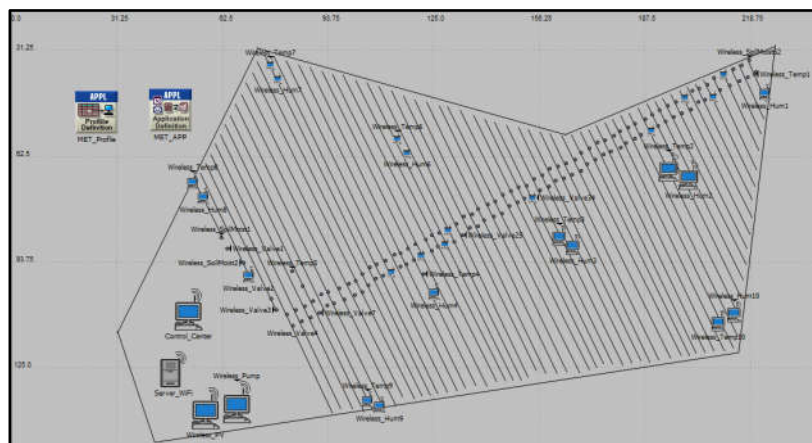


Figura 3.15 b) Simulación del caso completo con comunicación Wi-Fi.

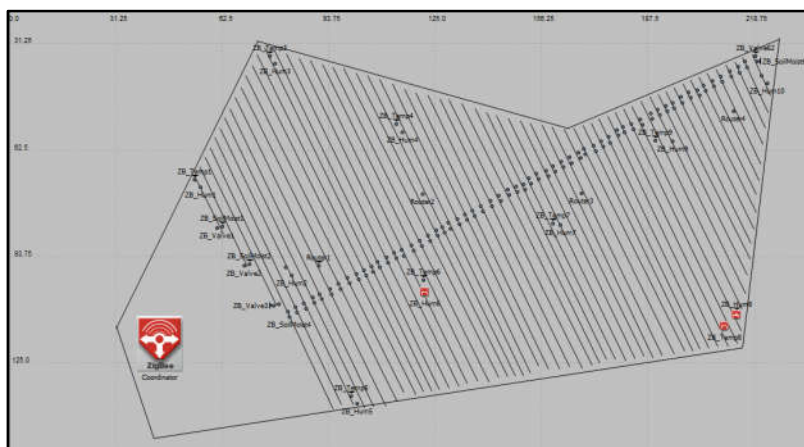


Figura 3.15 c) Simulación del caso completo con comunicación Zigbee.

3.3.5. Resultados Simulación

Las redes mostradas en las figuras 3.14 y 3.15 se evalúan de acuerdo a la medida del tiempo estimado de retardo y el tráfico de datos en el servidor:

- Tiempo estimado de retardo para el monitoreo de los datos: representa el tiempo (en segundos) que demoran los datos medidos desde que son enviados por cada nodo hasta que son recibidos por el servidor de control central de la red.
- Tráfico recibido por el servidor (bytes/s): se compara la cantidad de información generada que se transmite con el tráfico recibido por el servidor.

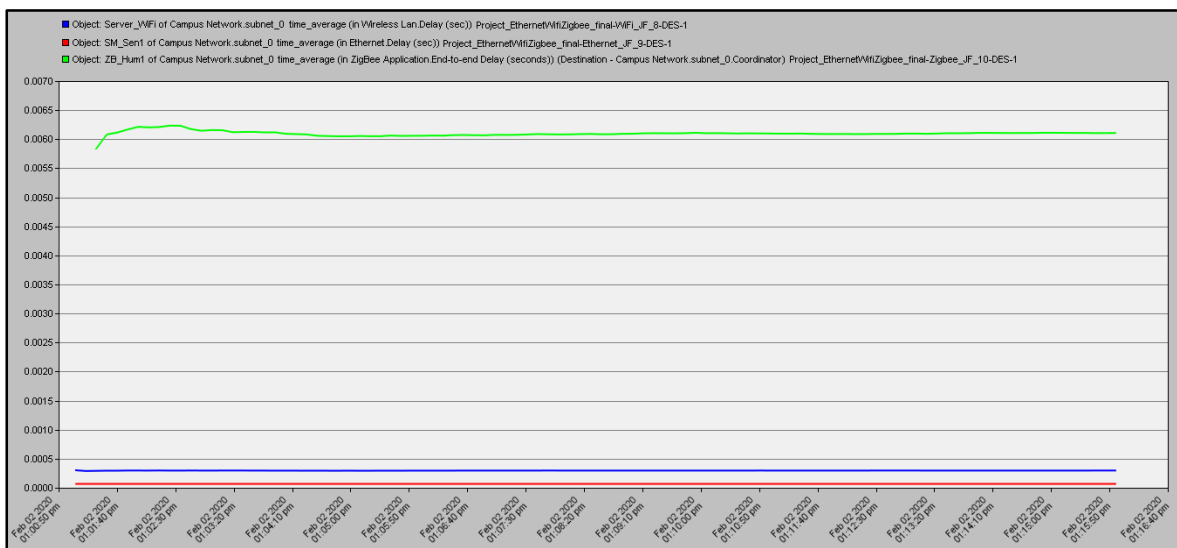


Figura 3.16. Retraso en la señal de las 3 tecnologías para el prototipo.

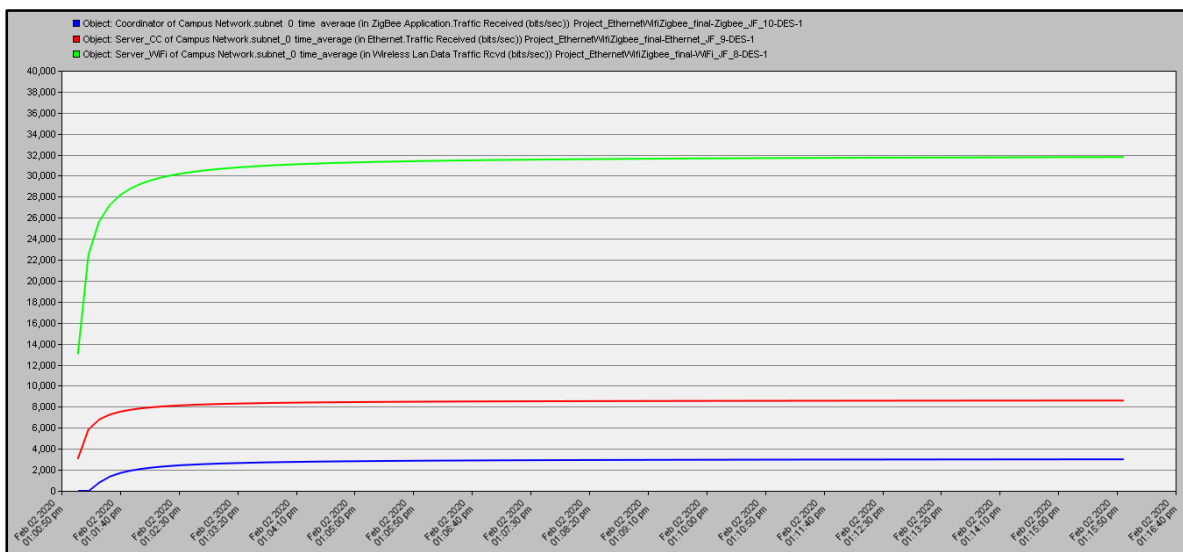


Figura 3.17. Tráfico recibido de las 3 tecnologías para el prototipo.

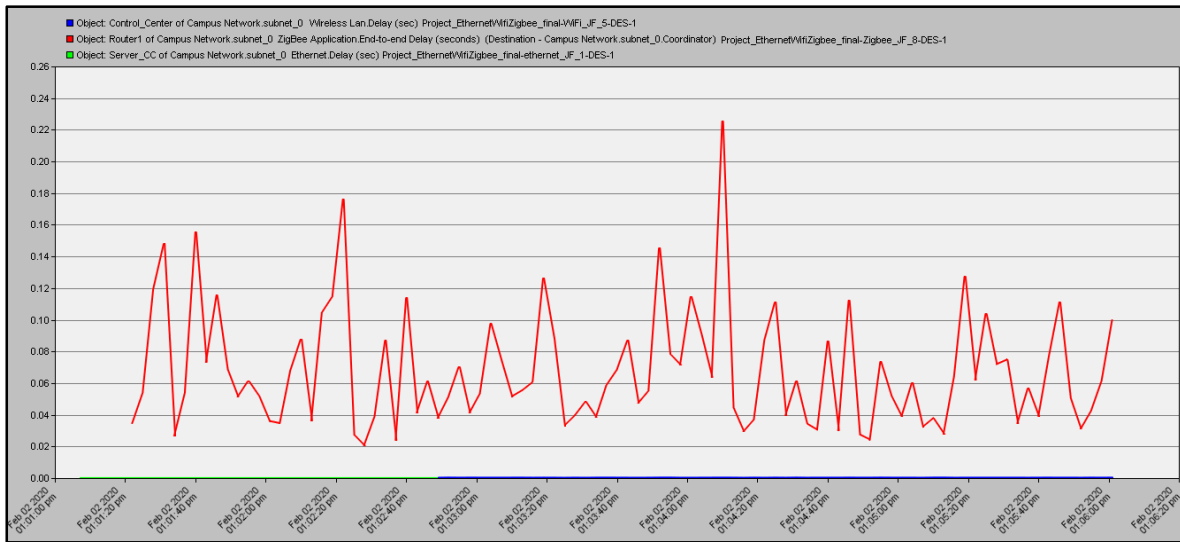


Figura 3.18. Retraso en la señal de las 3 tecnologías para el caso completo.

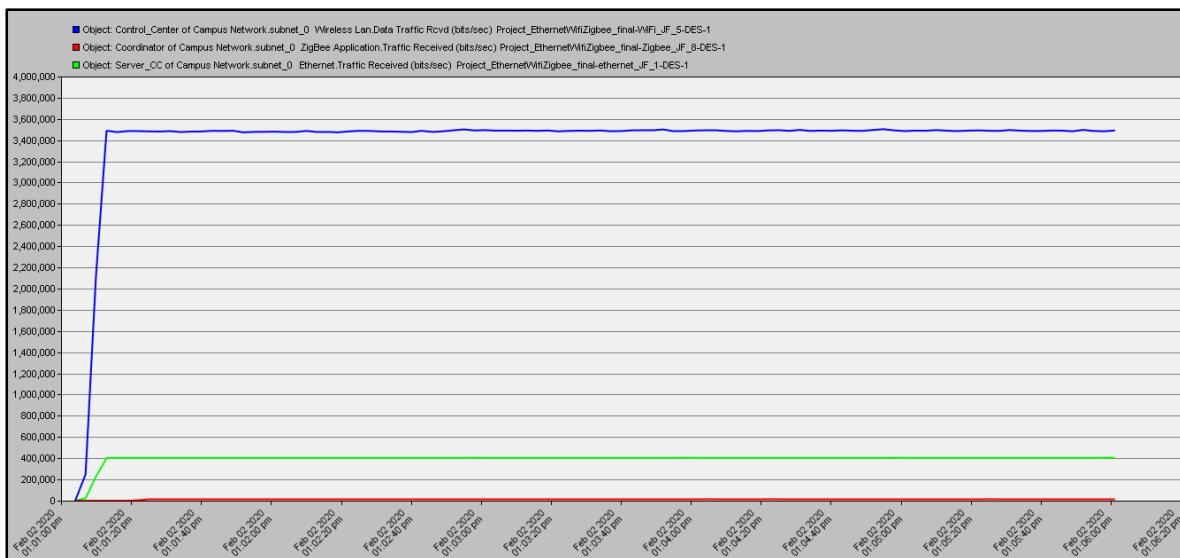


Figura 3.19. Tráfico recibido de las 3 tecnologías para el caso completo.

Las simulaciones realizadas en OPNET muestran el retraso y el tráfico que recibe el servidor de cada uno de los casos. Tanto para el caso completo, donde se monitorea todo el sector, como para el prototipo, la comunicación ethernet es la que sufre menor retardo en la señal, gracias a que se conecta por medio de cable, lo que hace que la velocidad de transmisión sea mucho mayor. El cableado también hace que la tecnología no sea la idónea para el monitoreo de grandes extensiones de campo. La elección finalmente queda entre las dos opciones inalámbricas.

Si bien Zigbee es la que menor tráfico debe manejar, también es la que tiene mayor retardo y a medida que la cantidad de sensores aumenta, el problema crece, llegando a 70ms en el monitoreo del campo completo.

Finalmente, Wireless Lan o Wi-Fi tiene un retraso de 0,38ms, bastante similar a los 0,3ms obtenidos en la simulación del prototipo, aun cuando la cantidad de sensores es bastante mayor que en el caso del prototipo (ver tabla 3.14).

Tabla 3.14 Resumen del tráfico recibido y el retraso en las señales.

Comunicación	Caso Completo		Prototipo	
	Tráfico Recibido	Retraso de Señal	Tráfico Recibido	Retraso de Señal
Ethernet	400.000bits/s	0,03ms	8.500bits/s	0,018ms
Wireless Lan	3.500.000bits/s	0,38ms	32.000bits/s	0,3ms
ZigBee	13.000bits/s	70ms	3.100bits/s	6ms

3.4. Implementación en terreno WSN

Se prepara e instala un prototipo con los 3 sensores en una de las filas de la viña que se conecta con la estación base, dispuesta en el sector de las oficinas como se indica en la figura 3.19. La comunicación elegida fue Wi-Fi, por tratarse de una tecnología más conocida.

3.4.1. Ubicación

La fila más cercana a la estación base dentro de Maitén 1A es la elegida para la instalación del prototipo. La que se encuentra a 15 metros de distancia con respecto a la estación base, con lo que se espera que no exista problemas con la comunicación.

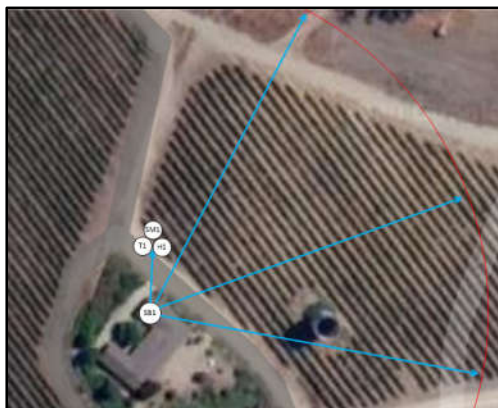


Figura 3.20 Imagen satelital de la distancia máxima cubierta por comunicación Wi-Fi

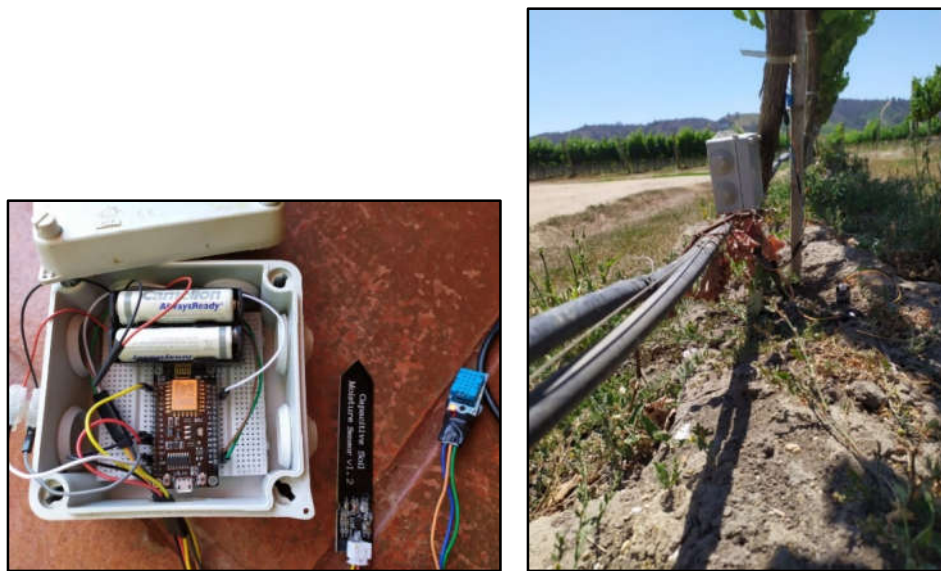


Figura 3.21 Imagen del prototipo en terreno.

3.4.2. Configuración y Programación

Tanto el microcontrolador ESP8266 como el microcomputador Raspberry Pi que se utiliza en el prototipo fueron programados para comunicarse entre sí y con la plataforma de almacenado. Se necesita trabajar con Arduino IDE para cargarle la codificación correspondiente al ESP, con el que será capaz de recibir las lecturas de los sensores en terreno. Así mismo, el Raspberry utiliza Python como base para la programación correspondiente, mediante la cual es posible escuchar a cada nodo de sensores y enviar la información pertinente a la plataforma de visualización elegida. Toda la programación se encuentra adjunta en el Anexo.

Finalmente, se requiere el uso de Node-Red, herramienta que permite una sencilla programación a través de bloques utilizando los datos que recibe la estación base desde los sensores dispuestos en el campo. Los resultados obtenidos se visualizan a través de la plataforma Thingspeak, permitiendo tener gráficas en tiempo real de lo que está ocurriendo en terreno, tan sólo teniendo acceso a internet, porque es posible de visualizar en smartphone o tablet. Ambos programas son completamente gratuitos.

3.4.3. Resultados Implementación

Por la parte de Node-RED, se seleccionan los bloques de acuerdo con la programación del prototipo (ver figura 3.22). Es así como es posible observar en tiempo real las mediciones instantáneas de temperatura y humedad ambiental, más la humedad del suelo.

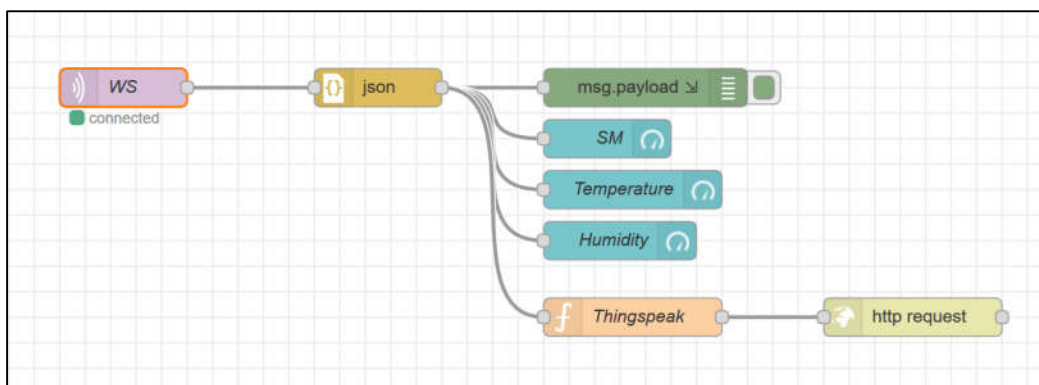


Figura 3.22 Programación de bloques en Node-RED

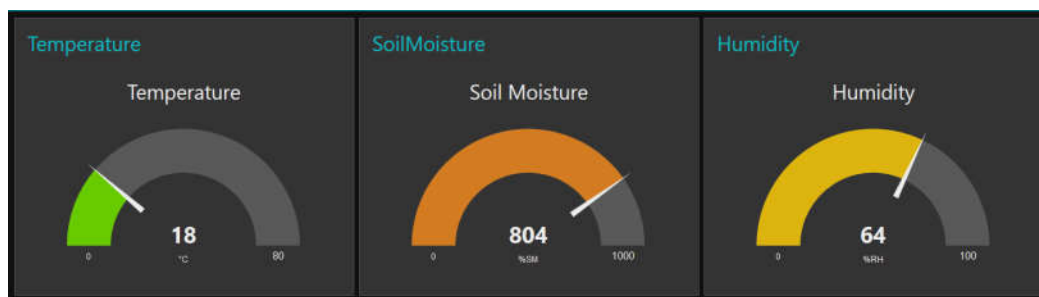


Figura 3.23 Visualización de señales instantáneas de Node-RED

Con las gráficas de la figura 3.23 como respaldo, se procede a conectar Node-RED con Thingspeak. Para acceder a Thingspeak es necesario una cuenta Mathworks, porque esta plataforma utiliza MATLAB para el análisis y visualización de los datos. Para las mediciones del prototipo, la plataforma elegida funciona muy bien y es gratuita, sin embargo, existe la opción de tener acceso completo a las funciones, a través de una licencia pagada. Es posible acceder a las gráficas a través de un link único que aloja toda la información. En el caso específico de estudio, se tiene el resultado de una semana de mediciones cómo es posible observar en cada una de las figuras 3.24 que representan la temperatura y humedad ambiental, además de la humedad del suelo.

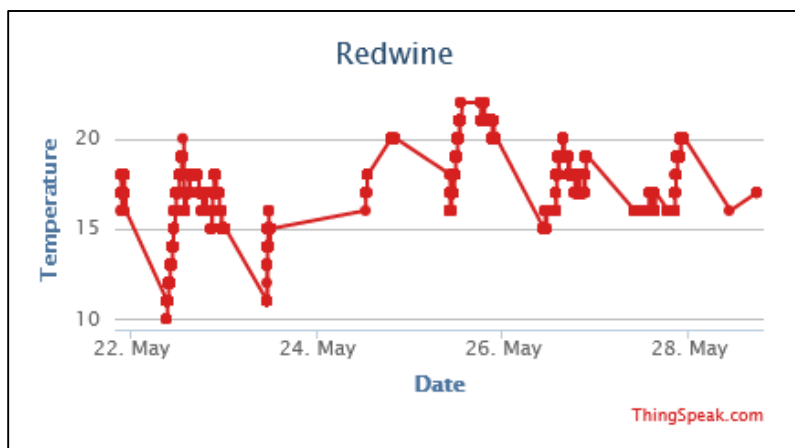


Figura 3.24 a) Visualización de la temperatura ambiental

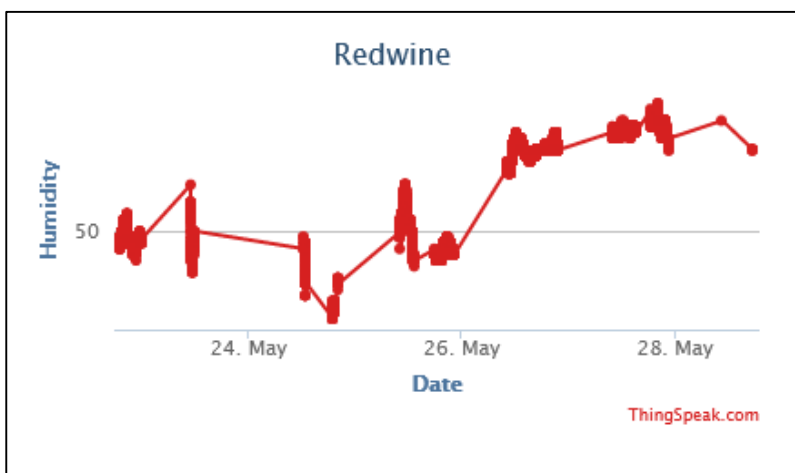


Figura 3.24 b) Visualización de la humedad ambiental

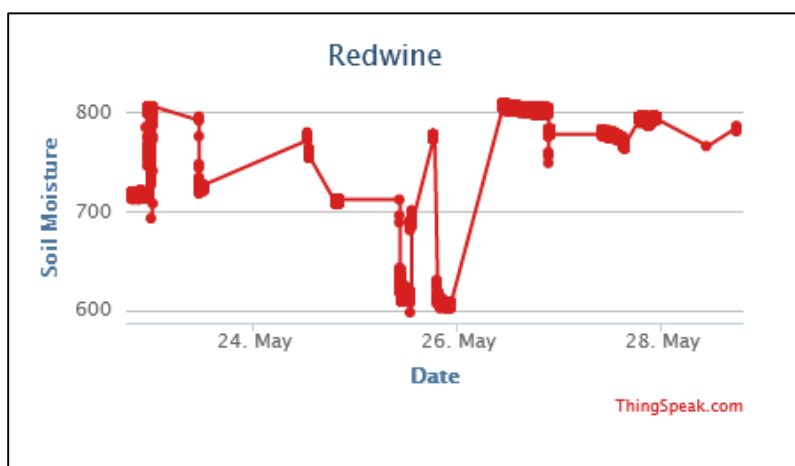


Figura 3.24 c) Visualización de la humedad del suelo

3.5. Análisis Financiero y Emisiones de CO2

3.5.1. Emisiones de CO2

Viña Casablanca ha intentado tener un enfoque amigable con el medioambiente, por lo que es importante considerar las emisiones de CO2 que se están evitando al utilizar una generación renovable. De acuerdo con los datos presentados por el Ministerio de Energía, se tiene el factor Gases de Efecto Invernadero del Sistema Interconectado Central, como se observa en la tabla 3.16.

Tabla 3.15 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para el SIC.

Año – SIC	Ton CO2 / MWh
2010	0,355
2011	0,384
2012	0,395
2013	0,435
2014	0,367
2015	0,346
2016	0,397
2017	0,336

Fuente: Elaboración propia, Ministerio de Energía

Lo siguiente es obtener la cantidad de CO₂ ahorrado por la instalación del sistema de 30kW. Se conoce la cantidad de CO₂ que se ha evitado generar y alcanza las 274 TonCO₂ para el caso original de la carga siendo sólo la bomba de agua, al usar energía eléctrica renovable no convencional durante 25 años.

Extrapolando los valores obtenidos en cada caso, se puede conocer la cantidad de CO₂ que se evita emitir considerando sólo la energía consumida (tabla 3.17).

Tabla 3.16. Detalle del Balance de CO2

Casos de estudio	Energía Disponible	Ton CO2 por 25 años	Energía Consumida	Ton CO2 por Energía Consumida
30 kW	39,35 MWh/año	274,0	13,34 MWh	92,89
30 kW + 3 kW	39,1 MWh/año	276,3	17,24 MWh	121,83
30 kW + 6 kW	38,97 MWh/año	289,2	21,16 MWh	157,03

Fuente: elaboración propia, datos provenientes de la simulación en PVSYST.

3.5.2. Análisis Financiero.

Es necesario conocer los costos, ingresos, inversión inicial y financiamiento asociados a la instalación del sistema de monitoreo y generación fotovoltaica.

En cuanto al sistema de monitoreo de riego inteligente, esta solución no comercial se detalla a continuación en la tabla 3.17. Se considera el sistema completo (simulado) para el sector de Maitén 1A.

Tabla 3.17. Costo del sistema de monitoreo para agricultura inteligente.

Dispositivos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
NodeMCU CH340	76	\$3.600	\$273.600
Raspberry Pi 3B+	1	\$46.000	\$46.000
ProtoBoard Mini	72	\$800	\$57.600
Enclosure	72	\$5.300	\$381.600
Pilas AA	288	\$500	\$144.000
Válvula de Riego 12 VDC 1/2"	62	\$6.500	\$403.000
Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental DHT11	10	\$1.700	\$17.000
Sensor de Humedad del Suelo	62	\$4.500	\$279.000
Cables Dupont (HH-HM-MM) 30cm	2000	\$100	\$200.000
Total			\$1.801.800

El costo del sistema de monitoreo es de \$1.801.800.- para 1 hectárea de la viña Casablanca. Es un costo bastante menor que el esperado para la instalación fotovoltaica y se añade al análisis total. Estos resultados sirven de primer paso para una futura instalación, con el monitoreo de la extensión total de la viña.

Para facilitar los cálculos con respecto a la instalación solar, es posible usar el precio actual de la energía eléctrica, lo que es considerado como un criterio conservador, para el análisis del proyecto durante toda su vida útil. El costo de la energía consumida por la bomba se calculó a partir de los datos proporcionados por la viña (ver Anexo C).

Tabla 3.18. Comparativa de los costos de energía según el caso.

Caso	Energía consumida	Costo de Energía	Costo Total Anual	Energía disponible al año	Costo Total Anual
1	13,32 MWh/año	~70 \$/kWh	\$ 932.400	39,35 MWh	\$ 2.754.500
2	17,24 MWh/año	~70 \$/kWh	\$ 1.206.800	39,1 MWh	\$ 2.737.000
3	21,17 MWh/año	~70 \$/kWh	\$ 1.481.900	38,97 MWh	\$ 2.727.900

La inversión inicial, llamada usualmente CAPEX, abarca el costo del equipamiento, la instalación y la puesta en marcha del sistema, considerando un 8% de imprevistos, se tiene una inversión cercana a los \$260.000.000 (de pesos chilenos). Se tiene además el OPEX, que corresponde a las mantenciones básicamente y que se dimensionan como 1,5% del CAPEX cuyo valor ronda los \$3.800.000.

Existen dos indicadores que nos permiten saber si el proyecto es rentable o no y son el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno. Un TIR aceptable para proyectos fotovoltaicos usualmente se encuentra entre el 13 y 15%, aunque también sirve considerar un retorno mayor a que si se pusiera ese dinero en el banco o se optara por otro negocio.

El índice de precios de sistemas conectados a la red en Chile de la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) [11], el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección a la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania y el Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, apunta a que para estaciones fotovoltaicas de 30kW, el costo de la instalación debería fluctuar entre los \$20.900.000 y \$68.400.000. Esto se puede contrastar con el valor obtenido como inversión inicial del proyecto o CAPEX, aproximadamente 4 veces el mayor que la instalación “más cara” conectada a la red.

Se calcula el VAN y el TIR con ayuda de MS Excel y sus fórmulas prediseñadas. La inversión inicial corresponde a 253.192.642 pesos, la tasa de interés se toma como 4,2% y los costos de energía anuales se toman de la tabla 3.19.

La tasa de retorno para todos los casos analizados es menor a 0, lo que indica que la instalación no es rentable, o sea, no se logrará recuperar la inversión al año 20 de funcionamiento. Se analiza el caso ideal en que toda la energía disponible es utilizada, y no es posible obtener un TIR positivo.

Tabla 3.19 Análisis de factibilidad económica del proyecto.

	Inversión inicial \$	Flujo de caja \$/año	Tasa de Interés	Años de uso	VAN \$	TIR %
Caso 1	253.192.642	932.400	4,2 %	20	-240.742.507	-17,6848040
Caso 2	253.192.642	1.206.800	4,2 %	20	-237.078.503	-16,3132179
Caso 3	253.192.642	1.481.900	4,2 %	20	-233.405.152	-15,1839992
Caso 4: Energía Disponible Caso 1	253.192.642	2.754.500	4,2 %	20	-216.412.400	-11,5349579

El sistema de respaldo de baterías es la parte más costosa monetariamente que se tiene en la instalación. El coste de estos elementos es mayor a la mitad de la inversión inicial, alcanzando los \$165.267.200.

Teniendo esto último en cuenta, es posible ajustar ciertos parámetros: se reemplaza la bomba de 30kW por una bomba de menor tamaño, eligiendo una de 15kW; el riego se redistribuye, de tal forma de suministrar la misma cantidad de agua que una bomba de 30kW, pero con ésta funcionando durante más tiempo y reduciendo la autonomía del sistema a 1 día. Las baterías se reducen a tan sólo 80 reemplazando la autonomía, con lo que la inversión llega hasta los \$112.869.063 y el Valor Actual Neto se redujo hasta -\$75.891.998 con una Tasa Interna de Retorno de -6,035% (ver anexo D).

Conclusiones

La agricultura de precisión es una gran oportunidad para potenciar el uso inteligente y responsable del suelo y principalmente del agua, haciendo a la granja mucho más eficiente en el gasto de un recurso preciado y escaso, especialmente en las regiones centro-sur de Chile, afectadas por una de las peores sequías de los últimos años.

El monitoreo constante de las variables climáticas, del suelo y de la planta, ayudan a decidir la estrategia a seguir para que los viñedos se desarrollen de la mejor forma posible. Es posible controlar el agua con el que se riega, sin sobrepasarse o subdimensionar la cantidad que puede aguantar la tierra y la cantidad de agua necesaria para el óptimo crecimiento de la vid.

La automatización del riego también traería cambios en la forma de riego. Se puede calendarizar y programar el riego para lograr una mejor utilización del agua, por ejemplo, al regar de noche porque sin efecto del sol y el calor el agua no se evapora y es así consumida en su totalidad por el suelo y la planta. También se evitarían los días con excesivas horas continuas de riego, disminuyendo la carga sobre la bomba.

Para grandes extensiones de campo, es mejor la utilización de tecnologías inalámbricas en la construcción de la red de sensores. Hay un ahorro considerable de dinero por temas de cableado y no existen mayores problemas de retraso en las señales simuladas, especialmente con Wi-Fi.

Las energías renovables, en especial la fotovoltaica, tienen un gran futuro en nuestro país. Los precios han ido disminuyendo sostenidamente y nuestro territorio tiene un gran potencial fotovoltaico, lo que ha impulsado fuertemente la implementación de esta tecnología en las nuevas centrales, sumado al plan de eliminar el uso de centrales a carbón para el año 2050 en Chile.

El consumo de energía en la viña no sigue un patrón constante o siquiera estable, sin embargo, el mayor consumo de energía coincide con la época de mayor generación también. El perfil de carga de la bomba muestra consumo 0 durante casi 5 meses del año, pero durante estos meses de no consumo los paneles seguirán produciendo energía, no habrá carga que alimentar y las baterías estarán en su máxima capacidad, eso significa que una gran cantidad de energía eléctrica desperdiciada que, de acuerdo con los resultados obtenidos, corresponde a más de la mitad de la energía generada y que simplemente se pierde. Ante esto, se puede tomar la

decisión de añadir cargas durante los meses de invierno, en forma de calefacción para utilizar de mejor manera la energía.

Si a lo anterior se le añade la gran inversión inicial que significa instalar un sistema aislado con respaldo de baterías, se puede pensar en, por ejemplo, habilitar una conexión a la red de energía local, y a través del net-metering vender los excedentes de energía durante el año. Esta es una posibilidad que se podría aplicar en la viña, que cuenta con un empalme a la red. De acuerdo con lo observado, también es factible un cambio de bomba. La estrategia en este caso sería distribuir el riego y con una bomba más pequeña se puede alimentar tramos de menor tamaño, pero si además se le añade una calendarización de los riegos, permitiría regar en un par de días lo que se cubre con la bomba original, pero disminuyendo la carga de ésta, bajando los requerimientos de almacenamiento en las baterías y, por lo tanto, se reduciría la inversión inicial.

Referencias

- [1] División de Protección Agrícola y Forestal Subdepartamento de viñas, vinos y bebidas alcohólicas SAG - Catastro Vitícola Nacional 2017
- [2] Ministerio del Interior y Seguridad Pública [en línea] <<http://www.intendenciavalparaiso.gov.cl/noticias/presidente-de-la-republica-decreta-zona-de-catastrofe-por-sequia-a-todas-las-comunas-continentales-de-la-region-de-valparaiso/>>
- [3] Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción - Diseño y Dimensionamiento de Sistemas Solares Fotovoltaicos Conectados en Red. Santiago, Chile. CDT, 2013. 100p.
- [4] Departamento de Geofísica. Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. [en línea] <<http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>>
- [5] Ortega-corrall, C., & López-montoya, J. E. (2018). Remote soil moisture measurements of a Baja California vineyard using a Wireless Sensor Network, 6(12), 205–210.
- [6] “Indicadores Sustentables VCB”, Viña Casablanca 2019.
- [7] Dirección General de Aeronáutica Civil (2019). Anuarios Climatológicos de Chile. [en línea] <<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/anuarios>>
- [8] “Registro de Riego 2018-2019 - S. Isabel Plan”, Viña Casablanca 2019.
- [9] Kirkham, M. B. (2014). Principles of Soil and Plant Water Relations. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420022-7.00010-0>
- [10] Sitio web de sonda de monitoreo de humedad del suelo. [en línea] <<http://www.topharvest.cl/monitoreo-de-humedad-de-suelo-aquacheck/>>
- [11] NAMA Chile. (2019). Índice de Precios de Sistemas Fotovoltaicos (FV) conectados a la red de distribución comercializados en Chile, version 2019. 1–6. http://minenergia.cl/archivos_bajar/2020/02/Factsheet_IP_FV_Final.pdf
- [12] Comisión Nacional de Energía (junio, 2020). Capacidad total instalada neta. [en línea] <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>

- [13] Rosebrock, E. Filson, E. (2004). Setting up LAMP: Getting Linux, Apache, MySQL, and PHP Working Together
- [14] Qazi, S. (2017). Fundamentals of Standalone Photovoltaic Systems. In Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803022-6.00002-2>
- [15] PVSyst TUTORIAL PVSyst TUTORIAL. (n.d.). 1–15.
- [16] Ahmed, M. A., Kang, Y. C., & Kim, Y. C. (2015). Communication network architectures for smart-house with renewable energy resources. *Energies*, 8(8), 8716–8735. <https://doi.org/10.3390/en8088716>

II. Anexos

Anexo A

Programación utilizada para la Estación Base (Raspberry Pi 3B+)

Initialize_DB_Tables

```
import sqlite3

# SQLite DB Name
DB_Name = "Jn.db"

# SQLite DB Table Schema
TableSchema="""
drop table if exists DHT22_Temperature_Data;
create table DHT22_Temperature_Data (
    id integer primary key autoincrement,
    SensorID text,
    Date_n_Time text,
    Temperature text
);

drop table if exists DHT22_Humidity_Data;
create table DHT22_Humidity_Data (
    id integer primary key autoincrement,
    SensorID text,
    Date_n_Time text,
    Humidity text
);
"""

#Connect or Create DB File
conn = sqlite3.connect(DB_Name)
curs = conn.cursor()

#Create Tables
sqlite3.complete_statement(TableSchema)
curs.executescript(TableSchema)

#Close DB
curs.close()
conn.close()
```

Mqtt_listen_sensor_data

```
import paho.mqtt.client as mqtt
import json
import os
import datetime as dt
from store_Sensor_Data_to_DB import sensor_Data_Handler

# MQTT Settings
MQTT_Broker = "192.168.0.148"
MQTT_Port = 1883
Keep_Alive_Interval = 45
MQTT_Topic = "ESP1/#"

#Subscribe to all Sensors at Base Topic
def on_connect(mosq, obj, flags, rc):
    mqttc.subscribe(MQTT_Topic, 0)

#Save Data into DB Table
def on_message(mosq, obj, msg):
    # This is the Master Call for saving MQTT Data into DB
    # For details of "sensor_Data_Handler" function please refer "sensor_data_to_db.py"
    print ("MQTT Data Received...")
    print ("MQTT Topic: " + msg.topic)
    print ("Data: " + msg.payload)

    save_path = "data_log.csv"

    json_Dict = json.loads(msg.payload)
    T_dig = json_Dict['Temp_Dig']
    S_an = json_Dict['SM_Analog']
    H = json_Dict['Hum']

    #cambia el path donde se va a guardar en el raspberry
    save_path = "data_log.csv"
    log = open(save_path,'a')
    log.write(now.isoformat() + "," + str(S_an) + "," + str(T_dig) + "," + str(H)+"\n")
    log.close()

    try:
        if os.path.exists(save_path):
            print ("archivo existe")
            file = open(save_path,'a')

            #Estos serían los datos recibidos
            now = dt.datetime.now()
            file.write(now.isoformat() + "," + str(S_an) + "," + str(T_dig) + "," + str(H)+"\n")
        else:
            file = open(save_path,'w')

            #Estos serían los nombres de los encabezados de las columnas
            file.write("Time, Topic/TAG, SM_Analog, Temp_Dig,Hum\n")

            file.close()
    except Exception as exception_object:
        print("Ups:", exception_object)
```

```
def on_subscribe(mosq, obj, mid, granted_qos):
    pass

mqttc = mqtt.Client()

# Assign event callbacks
mqttc.on_message = on_message
mqttc.on_connect = on_connect
mqttc.on_subscribe = on_subscribe

# Connect
mqttc.connect(MQTT_Broker, int(MQTT_Port), int(Keep_Alive_Interval))

# Continue the network loop
mqttc.loop_forever()
```

Store_Sensor_Data_to_DB

```
import json
import sqlite3

# SQLite DB Name
DB_Name = "Jn.db"

#=====
# Database Manager Class

class DatabaseManager():
    def __init__(self):
        self.conn = sqlite3.connect(DB_Name)
        self.conn.execute('pragma foreign_keys = on')
        self.conn.commit()
        self.cur = self.conn.cursor()

    def add_del_update_db_record(self, sql_query, args=()):
        self.cur.execute(sql_query, args)
        self.conn.commit()
        return

    def __del__(self):
        self.cur.close()
        self.conn.close()

#=====
# Functions to push Sensor Data into Database

# Function to save Temperature to DB Table
def DHT22_Temp_Data_Handler(jsonData):
    #Parse Data
    json_Dict = json.loads(jsonData)
    SensorID = json_Dict['Sensor_ID']
    Date_and_Time = json_Dict['Date']
    Temperature = json_Dict['Temperature']

    #Push into DB Table
    dbObj = DatabaseManager()
    dbObj.add_del_update_db_record("insert into DHT22_Temperature_Data (SensorID,
Date_n_Time, Temperature) values (?,?,?)",[SensorID, Date_and_Time, Temperature])
    del dbObj
    print ("Inserted Temperature Data into Database.")
    print ("")

# Function to save Humidity to DB Table
def DHT22_Humidity_Data_Handler(jsonData):
    #Parse Data
    json_Dict = json.loads(jsonData)
    SensorID = json_Dict['Sensor_ID']
    Date_and_Time = json_Dict['Date']
    Humidity = json_Dict['Humidity']

    #Push into DB Table
    dbObj = DatabaseManager()
```

```

        dbObj.add_del_update_db_record("insert into DHT22_Humidity_Data (SensorID, Date_n_Time,
Humidity) values (?,?,?)",[SensorID, Data_and_Time, Humidity])
        del dbObj
        print ("Inserted Humidity Data into Database.")
        print ("")

```

```

#=====
# Master Function to Select DB Funtion based on MQTT Topic

def sensor_Data_Handler(Topic, jsonData):
    if Topic == "Home/BedRoom/DHT22/Temperature":
        DHT22_Temp_Data_Handler(jsonData)
    elif Topic == "Home/BedRoom/DHT22/Humidity":
        DHT22_Humidity_Data_Handler(jsonData)

#=====

```

Programación utilizada para el nodo de medición (ESP8266)

```
#include <ArduinoJson.h>

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

#include "DHTesp.h"

DHTesp dht;

//
#define Potentiometer A0

// Update these with values suitable for your network.
const char* ssid = "WOM-AFDDAE";
const char* password = "24240765";
const char* mqtt_server = "192.168.0.148";
//const char* mqtt_server = "iot.eclipse.org";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
long lastMsg = 0;
char msg[50];
int value = 0;
int threshold=50; // you might need to adjust this value to define light on/off status
void setup_wifi() {
  delay(100);
  // We start by connecting to a WiFi network
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  randomSeed(micros());
  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length)
{
} //end callback

void reconnect() {
  // Loop until we're reconnected
  while (!client.connected())
  {
    Serial.print("Attempting MQTT connection...");
    // Create a random client ID
    String clientId = "ESP8266Client-";
    String userName = "username";
    String passWord = "juan";
    clientId += String(random(0xffff), HEX);
    // Attempt to connect
    //if you MQTT broker has clientId,username and password
    //please change following line to
    if (client.connect(clientId.c_str(),userName.c_str(),passWord.c_str()))
```

```

//if (client.connect(clientId.c_str()))
{
  Serial.println("connected");
  //once connected to MQTT broker, subscribe command if any
  client.subscribe("MS1");
} else {
  Serial.print("failed, rc=");
  Serial.print(client.state());
  Serial.println(" try again in 5 seconds");
  // Wait 6 seconds before retrying
  delay(6000);
}
}
} //end reconnect()

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.setup(4, DHTesp::DHT11); // Connect DHT sensor to GPIO 17
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  client.setCallback(callback);
}

void loop() {

  StaticJsonBuffer<300> JSONbuffer;
  JsonObject& JSONencoder = JSONbuffer.createObject();

  if (!client.connected()) {
    reconnect();
  }
  client.loop();
  long now = millis();

  if (now - lastMsg > 500) {
    lastMsg = now;
    /* int val=analogRead(Potentiometer);
    float h = dht.getHumidity();
    float t = dht.getTemperature();
    */
    //JSONencoder["device"] = "ESP32_1";
    //JSONencoder["sensorType"] = "Temperature";
    JSONencoder["SM_Analog"] = analogRead(Potentiometer);
    JSONencoder["Temp_Dig"] = dht.getTemperature();
    JSONencoder["Hum"] = dht.getHumidity();

    char JSONmessageBuffer[100];

    JSONencoder.printTo(JSONmessageBuffer, sizeof(JSONmessageBuffer));
    Serial.println("Sending message to MQTT topic..");
    Serial.println(JSONmessageBuffer);

    if (client.publish("ESP1/WS", JSONmessageBuffer) == true) {
      Serial.println("Success sending message");
    } else {
      Serial.println("Error sending message");
    }
  }

  // client.loop();
  // Serial.println("-----");

  delay(10000);

```

Anexo B

Esquema de conexión eléctrica de paneles fotovoltaicos

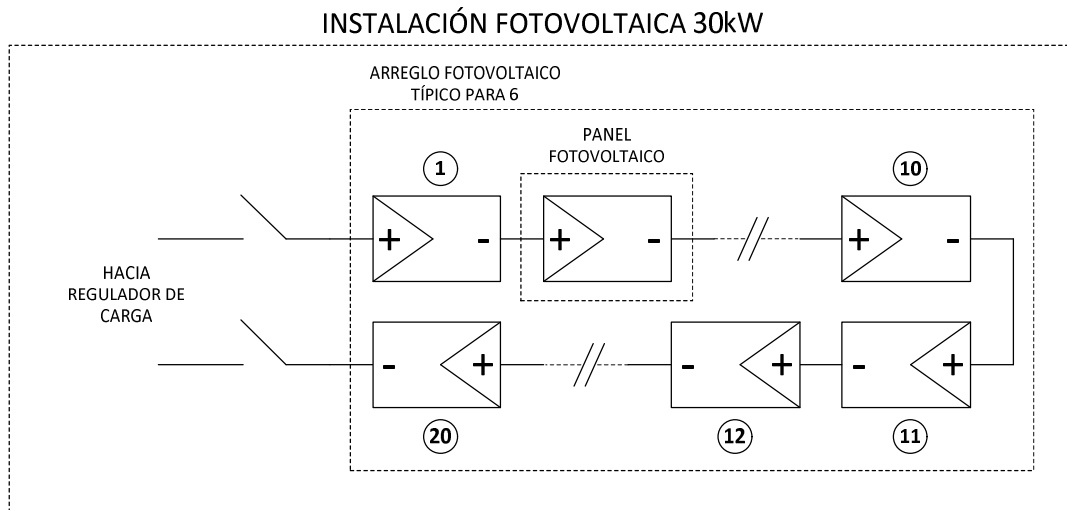


Figura B.1. Esquema de conexión de paneles solares.

Esquema de conexión eléctrica de baterías recargables.

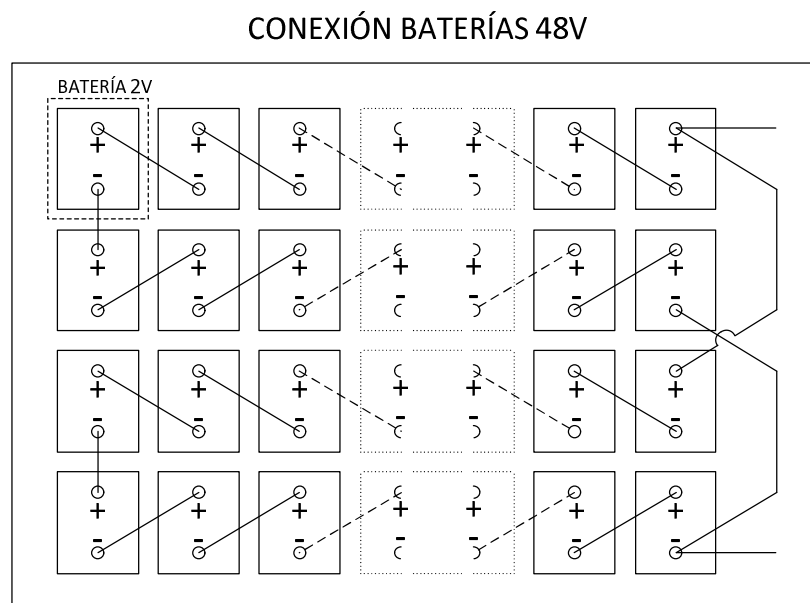


Figura B.2. Esquema de conexión de baterías recargables.

Esquemas de conexión eléctrica de inversores XTH.

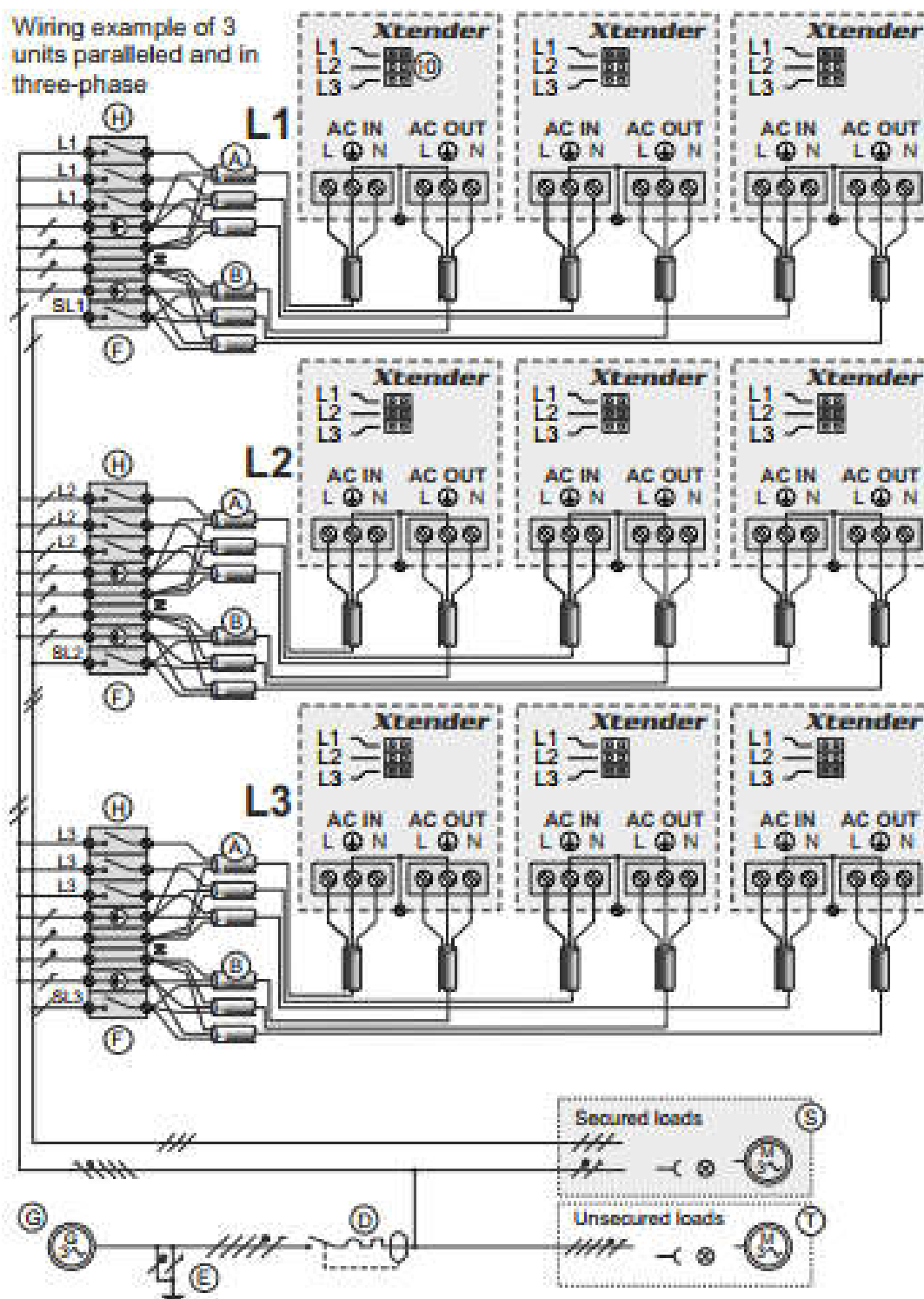


Figura B.3 Conexión del lado de AC de 3 unidades XTH con conexión trifásica.

Esquemas de conexión eléctrica de reguladores de carga.

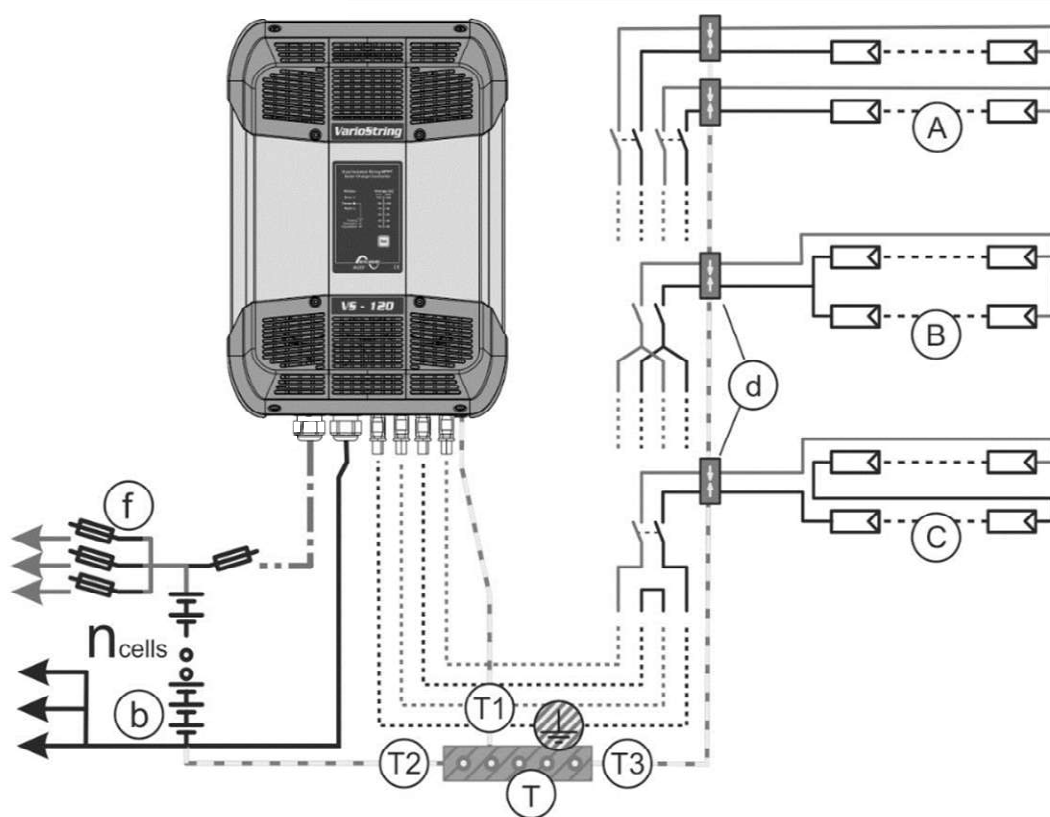


Figura B.4 Conexión del lado de DC del regulador de carga VS-120.

Anexo C

Energía consumida durante el período junio 2018 - mayo2019, correspondiente a un ciclo de las uvas.

Tabla C.1. Consumo energético de la viña Casablanca entre 2018 y 2019.

Año 2018	Santa Isabel (SI)		Año 2019	Santa Isabel (SI)	
	Medidor450-2			Medidor450-2	
	KWh	\$		KWh	\$
ENERO	14340	1.131.050	ENERO	18240	1.109.847
FEBRERO	15960	1.259.821	FEBRERO	15000	912.831
MARZO	14880	1.174.569	MARZO	21660	1.318.129
ABRIL	9780	697.980	ABRIL	10140	617.075
MAYO	6120	436.772	MAYO	4200	255.594
JUNIO	3180	226.951	JUNIO	2220	172.556
JULIO	2880	205.541	JULIO	3060	237.846
AGOSTO	3120	222.668	AGOSTO	2280	177.219
SEPTIEMBRE	2520	179.848	SEPTIEMBRE		
OCTUBRE	5160	313.958	OCTUBRE		
NOVIEMBRE	12060	733.785	NOVIEMBRE		
DICIEMBRE	11340	689.976	DICIEMBRE		
Total Anual	101.340,0	7.272.919,0	Total Anual	76800	4801097

Anexo D

Detalle de costos del sistema fotovoltaico y de monitoreo.

Tabla D.1. Valores de equipos y elementos para la instalación fotovoltaica.

Valores Instalación Fotovoltaica				
Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Panel Solar 250 Wp Canadian-Solar	120	u	\$120.000	\$14.400.000
Cable 4mm2 500m	10	u	\$913	\$9.130
Conduit Galvanizado 1/2" ANSI C-80 6m Dartel	10	mts	\$8.110	\$81.100
Varistor BSPH31000YPV EATON	12	u	\$205.600	\$2.467.200
Fusible 15A PV-15A 10F EATON	12	u	\$21.200	\$254.400
Regulador de Carga Studer VS-120, 600-900Vdc, 48Vdc	6	u	\$1.723.745	\$10.342.470
Cable 50mm2 RV-K 1x50mm2 Rhona	10	mts	\$6.400	\$64.000
Conduit PVC Sch 40 1" 6m	10	u	\$5.987	\$59.870
Varistor BSPH31000YPV EATON	12	u	\$205.600	\$2.467.200
Fusible 200A PV-200A-2XL EATON	12	u	\$311.872	\$3.742.464
Batería Rolls S-12-290 AGM, 12Vdc, 234Ah	496	u	\$333.200	\$165.267.200
Cable 50mm2 RV-K 1x50mm2 Rhona	10	mts	\$6.400	\$64.000
Conduit PVC Sch 40 1" 6m	10	mts	\$5.987	\$59.870
Varistor BSPH31000YPV EATON	2	u	\$205.600	\$411.200
Fusible 200A PV-200A EATON	2	u	\$311.872	\$623.744
Inversor Studer XTH-8000-48, 120Aac, 230Vac	6	u	\$6.075.322	\$36.451.932
Cable RV-K POWERFLEX 1x95mm2 1kV Dartel	60	mts	\$11.094	\$665.640
Conduit PVC Sch 40 1 1/2" 6m	10	u	\$9.546	\$95.460
Varistor BSPH31000YPV EATON	12	u	\$205.600	\$2.467.200
Fusible 200A PV-200A-2XL EATON	12	u	\$311.872	\$3.742.464
Cable 50mm2 RV-K 1x50mm2 Rhona	120	mts	\$6.400	\$768.000
Canalización 1" PVC Sch 40 6m	120	u	\$5.987	\$718.440
Estructura FluxSolar	2	u	\$1.875.000	\$3.750.000
Sistema de Monitoreo	1	u	\$1.420.200	\$1.420.200
Subtotal				\$250.393.184
Otros (8%)				\$2.003.145
Total				\$252.396.329

Tabla D.2. Valores de equipos y elementos para la instalación fotovoltaica, cantidad de baterías reducida.

Valores Instalación Fotovoltáica				
Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Panel Solar 250 Wp Canadian-Solar	120	u	\$120.000	\$14.400.000
Cable 4mm2 500m	10	u	\$913	\$9.130
Conduit Galvanizado 1/2" ANSI C-80 6m Dartel	10	mts	\$8.110	\$81.100
Varistor BSPH31000YPV EATON	12	u	\$205.600	\$2.467.200
Fusible 15A PV-15A 10F EATON	12	u	\$21.200	\$254.400
Regulador de Carga Studer VS-120, 600-900Vdc, 48Vdc	6	u	\$1.723.745	\$10.342.470
Cable 50mm2 RV-K 1x50mm2 Rhona	10	mts	\$6.400	\$64.000
Conduit PVC Sch 40 1" 6m	10	u	\$5.987	\$59.870
Varistor BSPH31000YPV EATON	12	u	\$205.600	\$2.467.200
Fusible 200A PV-200A-2XL EATON	12	u	\$311.872	\$3.742.464
Batería Rolls S-12-290 AGM, 12Vdc, 234Ah	80	u	\$333.200	\$26.656.000
Cable 50mm2 RV-K 1x50mm2 Rhona	10	mts	\$6.400	\$64.000
Conduit PVC Sch 40 1" 6m	10	mts	\$5.987	\$59.870
Varistor BSPH31000YPV EATON	2	u	\$205.600	\$411.200
Fusible 200A PV-200A EATON	2	u	\$311.872	\$623.744
Inversor Studer XTH-8000-48, 120Aac, 230Vac	6	u	\$6.075.322	\$36.451.932
Cable RV-K POWERFLEX 1x95mm2 1kV Dartel	60	mts	\$11.094	\$665.640
Conduit PVC Sch 40 1 1/2" 6m	10	u	\$9.546	\$95.460
Varistor BSPH31000YPV EATON	12	u	\$205.600	\$2.467.200
Fusible 200A PV-200A-2XL EATON	12	u	\$311.872	\$3.742.464
Cable 50mm2 RV-K 1x50mm2 Rhona	120	mts	\$6.400	\$768.000
Canalización 1" PVC Sch 40 6m	20	u	\$5.987	\$119.740
Estructura FluxSolar	2	u	\$1.875.000	\$3.750.000
Sistema de Monitoreo	1	u	\$1.420.200	\$1.420.200
Subtotal				\$111.183.284
Otros (8%)				\$889.466
Total				\$112.072.750

Tabla D.3. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 1.

Año	Flujo de Efectivo	Valor Presente
0	-\$253.192.642	-\$253.192.642
1	\$932.400	\$894.818
2	\$932.400	\$858.750
3	\$932.400	\$824.136
4	\$932.400	\$790.918
5	\$932.400	\$759.038
6	\$932.400	\$728.444
7	\$932.400	\$699.082
8	\$932.400	\$670.904
9	\$932.400	\$643.862
10	\$932.400	\$617.910
11	\$932.400	\$593.004
12	\$932.400	\$569.101
13	\$932.400	\$546.163
14	\$932.400	\$524.148
15	\$932.400	\$503.021
16	\$932.400	\$482.746
17	\$932.400	\$463.288
18	\$932.400	\$444.614
19	\$932.400	\$426.693
20	\$932.400	\$409.494
Valor Presente Neto (VPN)		-240.742.507
Tasa Interna de Retorno (TIR)		-17,6848040%
Tasa de Interés		4,2%

Tabla D.4. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 2.

Año	Flujo de Efectivo	Valor Presente
0	-\$253.192.642	-\$253.192.642
1	\$1.206.800	\$1.158.157
2	\$1.206.800	\$1.111.475
3	\$1.206.800	\$1.066.675
4	\$1.206.800	\$1.023.680
5	\$1.206.800	\$982.419
6	\$1.206.800	\$942.820
7	\$1.206.800	\$904.818
8	\$1.206.800	\$868.347
9	\$1.206.800	\$833.347
10	\$1.206.800	\$799.757
11	\$1.206.800	\$767.521
12	\$1.206.800	\$736.585
13	\$1.206.800	\$706.895
14	\$1.206.800	\$678.402
15	\$1.206.800	\$651.058
16	\$1.206.800	\$624.816
17	\$1.206.800	\$599.631
18	\$1.206.800	\$575.462
19	\$1.206.800	\$552.266
20	\$1.206.800	\$530.006
Valor Presente Neto (VPN)		-237.078.503
Tasa Interna de Retorno (TIR)		-16,3132179%
Tasa de Interés		4,2%

Tabla D.5. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 3.

Año	Flujo de Efectivo	Valor Presente
0	-\$253.192.642	-\$253.192.642
1	\$1.481.900	\$1.422.169
2	\$1.481.900	\$1.364.845
3	\$1.481.900	\$1.309.832
4	\$1.481.900	\$1.257.037
5	\$1.481.900	\$1.206.369
6	\$1.481.900	\$1.157.744
7	\$1.481.900	\$1.111.079
8	\$1.481.900	\$1.066.294
9	\$1.481.900	\$1.023.315
10	\$1.481.900	\$982.068
11	\$1.481.900	\$942.484
12	\$1.481.900	\$904.495
13	\$1.481.900	\$868.038
14	\$1.481.900	\$833.050
15	\$1.481.900	\$799.472
16	\$1.481.900	\$767.247
17	\$1.481.900	\$736.322
18	\$1.481.900	\$706.643
19	\$1.481.900	\$678.160
20	\$1.481.900	\$650.825
Valor Presente Neto (VPN)		-\$233.405.152
Tasa Interna de Retorno (TIR)		-15,1839992%
Tasa de Interés		4,2%

Tabla D.6. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 4.

Año	Flujo de Efectivo	Valor Presente
0	-\$253.192.642	-\$253.192.642
1	\$2.754.500	\$2.643.474
2	\$2.754.500	\$2.536.923
3	\$2.754.500	\$2.434.667
4	\$2.754.500	\$2.336.533
5	\$2.754.500	\$2.242.354
6	\$2.754.500	\$2.151.971
7	\$2.754.500	\$2.065.232
8	\$2.754.500	\$1.981.988
9	\$2.754.500	\$1.902.100
10	\$2.754.500	\$1.825.432
11	\$2.754.500	\$1.751.854
12	\$2.754.500	\$1.681.242
13	\$2.754.500	\$1.613.476
14	\$2.754.500	\$1.548.441
15	\$2.754.500	\$1.486.028
16	\$2.754.500	\$1.426.131
17	\$2.754.500	\$1.368.647
18	\$2.754.500	\$1.313.481
19	\$2.754.500	\$1.260.539
20	\$2.754.500	\$1.209.730
Valor Presente Neto (VPN)		-\$216.412.400
Tasa Interna de Retorno (TIR)		-11,5349579%
Tasa de Interés		4,2%

Tabla D.7. Valor presente neto y tasa de retorno, bomba 15kW y baterías reducidas.

Año	Flujo de Efectivo	Valor Presente
0	-\$112.869.063	-\$112.869.063
1	\$2.754.500	\$2.643.474
2	\$2.754.500	\$2.536.923
3	\$2.754.500	\$2.434.667
4	\$2.754.500	\$2.336.533
5	\$2.754.500	\$2.242.354
6	\$2.754.500	\$2.151.971
7	\$2.754.500	\$2.065.232
8	\$2.754.500	\$1.981.988
9	\$2.754.500	\$1.902.100
10	\$2.754.500	\$1.825.432
11	\$2.754.500	\$1.751.854
12	\$2.754.500	\$1.681.242
13	\$2.754.500	\$1.613.476
14	\$2.754.500	\$1.548.441
15	\$2.754.500	\$1.486.028
16	\$2.754.500	\$1.426.131
17	\$2.754.500	\$1.368.647
18	\$2.754.500	\$1.313.481
19	\$2.754.500	\$1.260.539
20	\$2.754.500	\$1.209.730
Valor Presente Neto (VPN)		-\$76.088.821
Tasa Interna de Retorno (TIR)		-6,0354048%
Tasa de Interés		4,2%

Índice de tablas

Tabla I.1. Especificaciones de dispositivos IoT.	7
Tabla 1.1. Índice de lluvias por año.....	9
Tabla 1.2. Índice de consumo de Electricidad año 2018.....	14
Tabla 1.3. Características principales de la bomba WEG.	14
Tabla 2.1. Características Sensor Humedad del Suelo.	19
Tabla 2.2. Características Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental.	20
Tabla 2.3. Características Microcontrolador ESP8266.	20
Tabla 2.4. Características Microcomputador Raspberry Pi.....	21
Tabla 2.5. Valores de radiación para Maitén 1A en unidades kWh/m2/día.....	26
Tabla 3.1: Características Batería Pb-Ácido.....	39
Tabla 3.2. Características Módulo fotovoltaico.....	40
Tabla 3.3. Características del regulador de carga.....	42
Tabla 3.4. Características del Inversor.	43
Tabla 3.5. Características del Fusible.....	44
Tabla 3.6. Características del Fusible.....	45
Tabla 3.7. Características del Interruptor.	45
Tabla 3.8. Características de la protección diferencial.....	45
Tabla 3.9. Detalles Cableado DC	46
Tabla 3.10. Detalles Cableado AC	46
Tabla 3.11 Simulaciones de Energía Fotovoltaica	49
Tabla 3.12 Características de los tipos de comunicación.....	52
Tabla 3.13 Sensores.....	53
Tabla 3.13 Modelo de nodo utilizado para la simulación OPNET.....	53
Tabla 3.14 Resumen del tráfico recibido y el retraso en las señales.....	58
Tabla 3.15 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para el SIC.	62
Tabla 3.16. Detalle del Balance de CO2	62
Tabla 3.17. Costo del sistema de monitoreo para agricultura inteligente.	63
Tabla 3.18. Comparativa de los costos de energía según el caso.....	64
Tabla 3.19 Análisis de factibilidad económica del proyecto.....	65
Tabla C.1. Consumo energético de la viña Casablanca entre 2018 y 2019.....	83

Tabla D.1. Valores de equipos y elementos para la instalación fotovoltaica.	84
Tabla D.2. Valores de equipos y elementos para la instalación fotovoltaica, cantidad de baterías reducida.	85
Tabla D.3. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 1.	86
Tabla D.4. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 2.	86
Tabla D.5. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 3.	87
Tabla D.6. Valor presente neto y tasa de retorno, caso 4.	87
Tabla D.7. Valor presente neto y tasa de retorno, bomba 15kW y baterías reducidas.	88

Índice de figuras

Figura I.1. Imagen satelital Maiten 1A.....	3
Figura I.2. Curva característica panel fotovoltaico I v/s V.....	5
Figura I.3. Curva característica panel fotovoltaico P v/s V.....	6
Figura 1.1 Detalle de conexionado interno del relé KH-103-4C.....	11
Figura 1.2. Geolocalización de la sala de bombas.....	13
Figura 1.3 Capacidad total de energía instalada en Chile (fuente: energiaabierta.cl)	15
Figura 2.1. Detalle de la solución propuesta para la viña Casablanca.....	17
Figura 2.2. Niveles del protocolo de comunicación.	18
Figura 2.3 Sensor de Humedad del Suelo SEN0193.....	19
Figura 2.4 Sensor de temperatura y humedad ambiental DHT11.	20
Figura 2.5. Microcontrolador ESP8266.....	21
Figura 2.6. Microcomputador Raspberry Pi 3B+.	21
Figura 2.7. Esquema del prototipo de medición agrícola.	22
Figura 2.8. Carta solar viña Casablanca según modelado de software PVSYST en a) coordenadas cartesianas y b) coordenadas polares.....	25
Figura 2.9. Magnitudes de radiación en Maitén 1A. Fuente: Explorador Solar.....	27
Figura 2.10. Detalle de posiciones del sol y panel con respecto a los puntos cardinales.	28
Figura 2.11. Sistema fotovoltaico detallado para la instalación en la viña.	29
Figura 2.12. Ubicación geográfica de la instalación fotovoltaica y otros puntos de la viña.....	29
Figura 3.1. Diagrama de flujo del dimensionamiento del sistema fotovoltaico.	37
Figura 3.2 Localización de la instalación fotovoltaica.	38
Figura 3.3 Distribución del consumo de energía de la bomba 1.	39
Figura 3.4. Batería S12-290 AGM.	40
Figura 3.5. Panel Solar 250W Canadian-Solar.....	40
Figura 3.6. Sombreado de paneles durante el año.	41
Figura 3.7. Estructura de soporte para instalación fotovoltaica desde distintas vistas.....	42
Figura 3.8. Regulador de carga Variostring VS-120.....	43
Figura 3.9. Inversor Xtender XTH-8000-48.....	44
Figura 3.10. Reticulado de malla puesta a tierra simulado en ETAP 12.6.....	46
Figura 3.11. Diagrama unilineal del sistema fotovoltaico.....	47
Figura 3.12 a). Caso 1: Producción fotovoltaica y pérdidas asociadas.	49
Figura 3.12 b). Caso 2: Producción fotovoltaica y pérdidas asociadas.	50

Figura 3.12 c). Caso 3: Producción fotovoltaica y pérdidas asociadas.	50
Figura 3.13 Gráfico de pérdidas del sistema fotovoltaico.	51
Figura 3.14 a) Simulación del prototipo con comunicación Ethernet	54
Figura 3.14 b) Simulación del prototipo con comunicación Wi-Fi.....	54
Figura 3.14 c) Simulación del prototipo con comunicación Zigbee.....	54
Figura 3.15 a) Simulación del caso completo con comunicación Ethernet.....	55
Figura 3.15 b) Simulación del caso completo con comunicación Wi-Fi.....	55
Figura 3.15 c) Simulación del caso completo con comunicación Zigbee.	55
Figura 3.16. Retraso en la señal de las 3 tecnologías para el prototipo.....	56
Figura 3.17. Tráfico recibido de las 3 tecnologías para el prototipo.	56
Figura 3.18. Retraso en la señal de las 3 tecnologías para el caso completo.	57
Figura 3.19. Tráfico recibido de las 3 tecnologías para el caso completo.....	57
Figura 3.20 Imagen satelital de la distancia máxima cubierta por comunicación Wi-Fi	58
Figura 3.21 Imagen del prototipo en terreno.	59
Figura 3.22 Programación de bloques en Node-RED	60
Figura 3.23 Visualización de señales instantáneas de Node-RED	60
Figura 3.24 a) Visualización de la temperatura ambiental	61
Figura 3.24 b) Visualización de la humedad ambiental	61
Figura 3.24 c) Visualización de la humedad del suelo	61
Figura B.1. Esquema de conexión de paneles solares.	80
Figura B.3 Conexionado del lado de AC de 3 unidades XTH con conexión trifásica.	81
Figura B.4 Conexionado del lado de DC del regulador de carga VS-120.....	82

Índice de términos

Nch 4/2003: Norma Chilena de Corrientes Débiles.

kW: Kilowatt.

VA: Volt-Ampere.

kWh: Kilowatt-hora.

Ah: Ampere-hora.

V: Volts.

A: Amperes.

P: Potencia eléctrica activa.

Hz: Hertz.

PV: Photovoltaic.

MPPT: Maximum Power Point Tracking. Seguimiento del punto de mayor potencia.

PWM: Pulse-Width Modulation. Modulación por ancho de pulso.

I_{sc}: Corriente de Cortocircuito del panel solar.

I_{mpp}: Corriente en el punto de potencia máxima del panel solar.

V_{oc}: Tensión en vacío del panel solar.

V_{mpp}: Tensión en el punto de potencia máxima del panel solar.

SoC: State of Charge. Estado de carga de la batería.

STC: Standard Test Conditions. Condiciones Estándar de Prueba.

ETAP: Electrical Transient Analysis Program.

OPNET: Optimized Network Engineering Tool.

GPIO: General Purpose Input/Output. Entrada/Salida de Propósito General.

ADC: Analog-to-Digital Converter. Convertidor de señal Análoga a Digital.

TCP/IP: Transmission Control Protocol / Internet Protocol.

IoT: Internet of Things. Internet de las Cosas.

Material de Referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o la institución