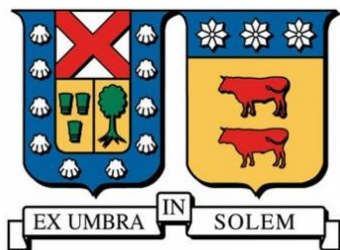


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“Evaluación Técnica Económica de Estrategia para
Calefacción de Invernaderos Zona Sur, Mediante
Energía Solar Activa o Almacenada”**

IGNACIO ALEJANDRO ARAYA GALLEGUILLOS

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

Profesor Guía: Mg.-Ing. JAIME ESPINOZA S.

Profesor Co ref.: Dr.-Ing. MARIO TOLEDO T.

Marzo 2022

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Angeli Galleguillos Ávila y a mi mami Edilia Ávila les agradezco la paciencia, apoyo incondicional y empuje para que yo pudiese terminar este proceso. Ustedes han sido y siempre serán mi energía para cumplir mis metas y sueños. Gracias por siempre estar.

Al Sr. Jaime Espinoza S., Profesor Magister Ingeniero, sin usted y su paciencia este trabajo lo hubiese logrado. Usted formó parte importante de mi historia con sus aportes profesionales cuando mis confusiones detuvieron el desarrollo de este trabajo. Gracias por sus orientaciones.

A todo el cuerpo docente del Departamento de Ingeniería Mecánica sus conocimientos técnicos, palabras justas y apoyos incondicionales, les agradezco el profesional que hoy tengo el gusto de ser.

A Doña Teresita Arenas, quien desde lo laboral me apoyó constantemente en mi desarrollo profesional y dar mi primera oportunidad laboral.

Agradezco a mis amigos y colegas por tanto apañe y compañerismo, quienes fueron mis acompañantes en este viaje que ya termina, no puedo dejar de mencionar esas noches de estudios y celebraciones, Ana Canales, Lorena Nuñez, Andrés Blaauboer, Gustavo García, Javiera Ferrada, Gino Ghiglino, Hans González, entre tantas bellas personas que me acompañaron.

También agradecer mi formación paralela en temáticas no académicas que el grupo de la Centro Derecha Universitaria (CDU UTFSM) que me tocó cofundar con José Luis Aravena, Pablo Bugueño, Valentina Millan, Francisco Sepúlveda, entre tantos otros/as integrantes.

Y, por último, pero no menos importante a mis colegas de la Dirección de Relaciones Estudiantiles en donde aprendí nuevas cosas que aportan a mi experiencia profesional mis grandes amigos/as Paulina Pereda, Juan Aspeé, Marcela Liberona, Eliana Ponce, Javiera Troncoso y Varinia Herrera.

Mención honrosa a mi pequeña Canela.

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mi madre Angeli Galleguillos que me dio la vida y ha estado conmigo en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	1
DEDICATORIA	1
ÍNDICE GENERAL.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Objetivos del trabajo.....	16
1.1.1 Objetivo general.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y BASE TEÓRICA.....	17
2.1 Antecedentes.....	17
2.2 Situación geográfica	17
2.3 Base Teórica: Energía Solar	18
2.3.1 Radiación solar directa.....	18
2.3.2 Radiación solar difusa.....	19
2.4 Sistemas Solares Térmicos.....	19
2.4.1 Clasificación.....	19
2.5 Sistema de acumulación.....	27
2.5.1 Aerotermos.....	27
2.5.2 Recuperadores de calor	28
2.5.3 Acumulador de calor en lecho de piedras	28
2.5.4 Quemador de biomasa.....	29

2.6	Invernadero.....	29
2.6.1	Construcción.....	30
2.6.2	Cubierta.....	33
2.6.3	Ventajas y desventajas de la implementación de un invernadero. ..	33
2.6.4	Dimensiones de invernadero	33
2.7	Variables climáticas.....	35
2.7.1	Temperatura	35
2.7.2	Humedad relativa	36
2.7.3	Radiación luminosa.....	36
2.7.4	Concentración CO ₂	36
2.8	Frutas y verduras.	37
2.8.1	Tomate.....	37
2.8.2	Lechuga.....	37
2.8.3	Pepino.....	38
2.8.4	Coliflor	39
2.8.5	Berenjena.....	40
2.8.6	Apio.....	40
2.8.7	Pimentón.....	41
2.8.8	Brócoli.....	41
2.8.9	Repollo	42
2.9	Sistema de control	44
2.9.1	Sistemas de calefacción.....	44
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE INGENIERÍA.		46
3.1	Dimensionamiento energético.	46

3.1.1	Datos técnicos panel solar	46
3.1.2	Aporte calórico	47
3.1.3	Pérdidas	50
3.1.4	Acumulador de calor en lecho de piedras.	50
3.1.5	Sensores e instrumentación.	60
CAPÍTULO 4. MONITOREO Y CONTROL DEL SISTEMA.....		63
CAPÍTULO 5. Análisis económico.....		64
5.1	Costos de construcción e instalación.	64
5.1.1	5.1.1. Costos de inversión	64
5.1.2	Costos de producción.	65
5.1.3	Gastos generales	66
5.1.4	Ventas.....	66
5.1.5	Costes Variables	67
5.1.6	5.1.6 Costo de consumo energético de los sistemas fotovoltaicos..	70
5.2	Financiamiento estatal.	73
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.....		76
6.1	Análisis de resultados.	76
6.2	Conclusiones.....	77
CAPÍTULO 7. Bibliografía.....		79

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2-1 Captador plano para agua	21
Ilustración 2-2 Captador plano de aire	22
Ilustración 2-3 Tubos de vacío	23
Ilustración 2-4 Colectores concentradores	24
Ilustración 2-5 Colector parabólico compuesto	25
Ilustración 2-6 Esquema de un CCP con sus partes y funcionamiento.....	26
Ilustración 2-7 Imagen referencial de aerotermo	27
Ilustración 2-8 Imagen referencial de recuperador de calor.....	28
Ilustración 2-9 Imagen referencial lecho de piedras	29
Ilustración 2-10 Tipos de techos y cubiertas para invernaderos	30
Ilustración 2-11 Invernadero capilla	31
Ilustración 2-12 Invernadero doble capilla	32
Ilustración 2-13 Sistema de calefacción.....	45
Ilustración 3-1 Datos técnicos del panel solar.....	47
Ilustración 3-2 Pérdidas.....	50
Ilustración 3-3 Almacenamiento de lecho de rocas de flujo vertical	51
Ilustración 3-4 Esquema de carga y descarga de calor en los sistemas de almacenamiento de lecho de rocas	51
Ilustración 3-5 Unidad de almacenamiento de lecho compacto.....	52
Ilustración 3-6 Distribución de temperatura en un almacenamiento de lecho de rocas durante la carga con aire a temperatura constante	54
Ilustración 3-7 Registro de temperatura en un lecho de rocas de Colorado State University House II, durante la carga y la descarga	55

Ilustración 3-8 Acumulador de lecho de rocas dividido en N segmentos.....	57
Ilustración 3-9 Esquema del acumulador en planta y corte	61
Ilustración 5-1 Ingresos y egresos.....	69
Ilustración 5-2 Análisis estadístico de precios de sistemas fotovoltaicos comercializados en Chile 2020, sin IVA	70
Ilustración 5-3 Comparación de IdP FV promedio en Chile para los años 2017, 2018, 2019 y 2020, sin IVA	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Valores de temperatura adecuados para varios cultivos hortícolas en invernadero	13
Tabla 1-2 Temperatura de consigna de la calefacción utilizadas para varios cultivos	14
Tabla 1-3 Potencia instalada media y necesidades de calefacción en función del gradiente térmico	14
Tabla 1-4 Valores de humedad adecuados a cada cultivo hortícola en invernadero ..	15
Tabla 2-1 Temperaturas promedio Rauco.....	18
Tabla 2-2 Dimensiones de invernadero.....	34
Tabla 2-3 Temperatura y humedad de las verduras	43
Tabla 3-1 Radiación solar	48
Tabla 3-2 Rad generado por SST [kWh]	48
Tabla 3-3 Demanda [kJ].....	49
Tabla 3-4 Meses	49
Tabla 5-1 Resumen total inversión	65
Tabla 5-2 Costos de producción.....	65

Tabla 5-3 Gastos generales	66
Tabla 5-4 Ventas	66
Tabla 5-5 Costos variables	67
Tabla 5-6 Ingresos y egresos.....	68
Tabla 5-7 Relación costo-beneficio	69
Tabla 5-8 Costo destacado de proyectos llave en mano por rango de potencia 2020 en CLP, sin IVA	71
Tabla 5-9 Valores promedios sin IVA y en (USD/kWp), del índice (IdP) de Chile y Alemania con su respectivo rango de potencia y porcentaje de variación del precio promedio por rango en 2020.	71
Tabla 5-10 Valores promedio del IdP FV en Chile en (USD/kWp) para los años 2017, 2018, 2019 y 2020, sin IVA	72
Tabla 5-11 Porcentajes de variación interanual del promedio por rango para el IdP de Chile	73

ÍNDICE DE FÓRMULAS.

Ecuación 1	34
Ecuación 2.....	34
Ecuación 3.....	34
Ecuación 4.....	47
Ecuación 5.....	47
Ecuación 6.....	47
Ecuación 7.....	56
Ecuación 8.....	56

Ecuación 9.....	56
Ecuación 10.....	56
Ecuación 11.....	56
Ecuación 12.....	57
Ecuación 13.....	57
Ecuación 14.....	58
Ecuación 15.....	58
Ecuación 16.....	58
Ecuación 17.....	58
Ecuación 18.....	59
Ecuación 19.....	59
Ecuación 20.....	59
Ecuación 21.....	59
Ecuación 22.....	59
Ecuación 23.....	60

RESUMEN

Este trabajo tiene como propósito elaborar estrategias que permitan disminuir los costos de producción y aumento en la productividad de pequeños agricultores, vía la evaluación de opciones de reducir o eliminar el alto consumo de LPG en invernaderos, ya sea para evitar las heladas o aportar el crecimiento de plantines. Los resultados obtenidos dan evidencia que es posible integrar opciones de calefacción de invernaderos del sector de Palquibudi (Rauco, Curicó), con cultivos de tomate, lechuga, repollos, brócoli, berenjena, apio, pimentón y pepino, tomando mediante tuberías de agua caliente, aerotermos, generadores de aire caliente, generadores y distribución, por manga de polietileno, de aire caliente logrando con ello una temperatura del aire interior más homogénea.

Se elaboran propuestas de proyecto factibles de ser presentados a fondos estatales para su implementación real por parte de los agricultores, toda vez que el Estado Chileno, conjuntamente con sus Programas de Energías Renovables para la Agricultura Sustentable y Programa de Medidas y Proyectos de ERNC y Eficiencia Energética de la Seremi de Energía, fomentan el financiamiento, lo que permite que una región con características especiales de aislamiento, logra dar respuesta a las diversas necesidades productivas y mejoramiento de la calidad vida rural en el país.

De igual forma, se evaluó la incorporación de acumuladores de calor nocturnos, en especial en épocas de heladas y sistemas de distribución homogénea del calor en el cultivo, permitiendo demostrar que estas alternativas exigen una buena aislación, bajas fugas y bajas pérdidas de carga. En cuanto a incorporar instrumentación de medición de parámetros de control es limitada y onerosa.

Finalmente se evalúan los costos de inversión y mantención del sistema solar o acumulación, demostrando que la relación beneficio/costo es 4 siendo ACEPTABLE desarrollar y llevar a cabo estas estrategias para la calefacción de invernaderos zona sur.

ABSTRACT

The aim of this work is to identify appropriate strategies to reduce production costs and increasing the productivity of small farmers, by the way of reducing high LPG consumption cost, either to avoid frost or to contribute to the growth of seedlings. The results obtained indicates that it was possible to evaluate heating options for greenhouses in the Palquibudi sector (Rauco, Curicó), with crops of tomato, lettuce, cabbage, broccoli, eggplant, celery, paprika and cucumber, taking into account hot water pipes, air heaters, generators of hot air, generators and distribution, by polyethylene sleeve, of hot air, and the most homogeneous interior air temperature.

Feasible project proposals were prepared to be presented to state funds for their real implementation by farmers, the Chilean State must jointly with its Renewable Energy Programs for sustainable agriculture and Program of Measures and Projects of NCRE and Efficiency Energy of the Seremi de Energía, promote financing, which allows a region with special characteristics of isolation, manages to respond to the various productive needs and improve the quality of rural life in the country.

In the same way, it was possible to evaluate the incorporation of heat accumulators to reduce low temperature at night and homogeneous distribution, demonstrating that these storage methods have as a requirement an adjusted insulation, low air leakage and low pressure drops, since different designs meet these demands, they are in turn designed correctly. As for incorporating control parameter measurement instrumentation, monitoring is carried out in a closed environment and over a large area, it is complicated and expensive to carry out wiring installations and infrastructure modifications.

Additionally, the investment and maintenance costs of the solar or accumulation system were evaluated, showing that the Cost-Benefit Ratio is 4, being ACCEPTABLE to develop and carry out the strategy for Heating Greenhouses in the South Zone, by means of Active or Stored Solar Energy.

GLOSARIO

Calefacción: Permite elevar la temperatura de determinado espacio en relación con la temperatura ambiental exterior para generar condiciones cómodas.

Colectores: Recipientes evacuados que se exponen a la atmósfera a través de una membrana permeable o un medio poroso que regula la tasa de ingreso.

Energía Solar Fotovoltaica: Se obtiene al convertir la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotoeléctrico.

Invernadero: Estructura variable tamaño y forma recubierta de vidrio, plástico u otros materiales impenetrables.

Radiación solar directa: Es la radiación solar recibida en la superficie terrestre sin que sufra ningún cambio de dirección en su recorrido.

Radiación solar difusa: Es la componente de la radiación solar recibida en la superficie después de que los procesos de reflexión y difusión de la atmósfera modifiquen su recorrido.

Sistemas Solares Térmicos: Corresponde a un conjunto de equipos y componentes que permite el aprovechamiento de la energía solar para la producción de agua caliente sanitaria.

Tubos de vacío: Dispositivos electrónicos que están configurados para proporcionar amplificación a las señales electrónicas.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

El contexto geográfico de la instalación del invernadero, según su latitud, altitud y orientación, entre otros, son algunos de los factores que especifican las necesidades energéticas para obtener un microclima idóneo en el interior del invernadero, ya que los dispositivos del clima y temperatura logran influir en el desarrollo de la planta. Además, en un invernadero, al no poseer un sistema de calefacción, permite que la temperatura no alcance un eficaz desarrollo armónico y compatible con los objetivos de producción que se planearon (Flores et al, 2011).

Por ello, la demanda energética de un invernadero estriba de la correspondencia entre las condiciones climáticas exteriores y necesidades ambientales de los cultivos dentro del mismo, dado que la revisión climática mejora el confort de las plantas, ayudando así a lograr los objetivos productivos del invernadero. Asimismo, los sistemas de calefacción y refrigeración son utilizados para vigilar la temperatura interior, permitiendo alcanzar valores óptimos de humedad y temperatura de manera más cercana a las recomendadas para su fabricación, ya que actualmente los sectores de los invernaderos para cultivos se extienden hacia el uso de técnicas constructivas y de control climático eficaz por la elevada sensibilidad de su producción a las condiciones ambientales (Lazaar et al, 2004).

Asimismo, las tipologías beneficiosas del sector hortícola, las medidas de climatización y aislamiento no están muy desarrolladas, ya que las especies hortícolas no son sensibles a las oscilaciones térmicas como los cultivos ornamentales o florales, que durante casi todo el año pueden cultivarse en invernaderos con ventilación natural como único sistema de climatización. Por ello, el material de cubierta usado es un factor que interviene de manera definitiva en las necesidades de calefacción o refrigeración de las plantas cultivadas en los invernaderos, además posee una relevancia en cuanto a la propia refrigeración que suministran estas mediante su transpiración y calor que entra o sale a través de los sistemas de ventilación (Molina-Aiz, Valera y Álvarez, 2004).

El balance de energía en un invernadero admite conocer los diversos parámetros de consumo y la potencia de calefacción (Q_{cal}) o de refrigeración (Q_{ref}) que se desea colocar, ya que permite del invernadero dar respuesta en situaciones meteorológicas críticas, entre otros. También, en la deducción de las necesidades de climatización del invernadero (Q_{cli}) actúan condiciones climáticas dentro y fuera a las que se expone el invernadero caracterizado por la intensidad máxima de radiación solar, temperatura y humedad exteriores y dirección y velocidad media del viento (Sethi y Sharma, 2008)

La primordial medida en el balance energético de un invernadero radica en la temperatura exterior, que logra establecer la forma directa de refrigeración y calefacción, cuyos valores del exterior determina la temperatura media mensual del mes más cálido, temperatura media de las máximas diarias del mes más cálido, temperatura máxima absoluta del año, temperatura media mensual del mes más frío, temperatura media de las mínimas mensuales y la temperatura mínima absoluta del año. Por otro lado, la temperatura del aire que se debe conservar dentro del invernadero estriba del tipo de cultivo que se desarrolla en su interior, nivel de confort deseado y su estado de crecimiento, tal como lo describe la Tabla 1-1 (Tesi, 2001).

Especie	Temp. mínima letal	Temp. mínima biológica	Temp. óptima		Temp. máxima biológica
			Noche	Día	
Tomate	(-2) a 0	8-10	13-16	22-26	26-30
Pepino	0	10-13	18-20	24-28	28-32
Melón	0	12-14	18-21	24-30	30-34
Judía	0	10-14	16-18	21-28	28-35
Pimiento	(-2) a 0	10-12	16-18	22-28	28-32
Berenjena	(-2) a 0	9-10	15-18	22-26	30-32

Tabla 1-1 Valores de temperatura adecuados para varios cultivos hortícolas en invernadero

Fuente: Tesi (2001).

Asimismo, la Tabla 1-2, muestra los valores utilizados como base para crear las consignas de funcionamiento de los sistemas de climatización, además de calcular su potencia de diseño mediante el balance de energía, ya que los valores de consigna de los sistemas de calefacción por lo general pueden variar en función del periodo del día y según

el cultivo, por lo que se debe considerar las condiciones de funcionamiento más restrictivas de la calefacción y su diseño para satisfacer las necesidades de calor durante las noches invernales (Urban, 1997).

Tabla 1. 1. Temperaturas de consigna de la calefacción utilizadas para varios cultivos.

Especie	Temperatura de calefacción del aire	
	Noche	Día
Tomate	17,5-20 °C	18,5-20 °C
Pepino	19-21 °C	21-23 °C
Pimiento	18-20 °C	22-23 °C
Berenjena	19-21 °C	21-22 °C

Tabla 1-2 Temperatura de consigna de la calefacción utilizadas para varios cultivos

Fuente: Urban (1997).

Por tanto, las necesidades energéticas del invernadero dependen esencialmente del salto térmico, dado la diferencia entre la temperatura interior y exterior que se desea mantener, tal como lo muestra la Tabla 1-3.

Salto térmico ($T_i - T_e$)	Potencia caldera ($W \cdot m^{-2}$)	Necesidades reales ($W \cdot m^{-2}$)
5	115	50
10	175	105
15	290	121

Tabla 1-3 Potencia instalada media y necesidades de calefacción en función del gradiente térmico

Fuente: FAO (2002).

Por el contrario, los sistemas de refrigeración se diseñan para lograr mantener unos contextos térmicos adecuados para el progreso de las plantas durante el periodo diurno en la época calurosa. Además de la temperatura del aire es prioritario mantener un idóneo régimen higrométrico para evitar el estrés hídrico estimulado cuando su valor disminuye o la condensación de agua sobre el cultivo o la cubierta del invernadero es excesiva, tal como lo describe la Tabla 1-4.

Especie	Temperatura óptima del sustrato	CO ₂ (ppm)	Humedad relativa (%)
Tomate	15-20	1000-2000	55-60
Pepino	20-21	1000-3000	70-90
Melón	20-22	–	60-80
Judía	15-20	–	–
Pimiento	15-20	–	65-70
Berenjena	15-20	–	65-70

Tabla 1-4 Valores de humedad adecuados a cada cultivo hortícola en invernadero

. Fuente: Tesi (2001).

Por tanto, la incorporación de calor externa, además del obtenido por la radiación solar, a fin de evitar la mínima letal y lograr una temperatura aceptable para las plantas, se transforma en el principal gasto de operación que debe efectuar el productor que cultiva en invernaderos. La energía solar, fotovoltaica (FV) o térmica, puede ser aprovechada para conservar la humedad relativa y temperatura según las necesidades del cultivo, por lo que la implementación de energía solar personifica una viable solución ante la insuficiencia de combustibles fósiles y aumento de contaminación ambiental originada por los gases de combustión, además es considerada energía limpia, debido a que durante el proceso de obtención y utilización no emite contaminantes a la atmosfera.

Actualmente, el sector agropecuario representa un área de oportunidad para la implementación de energías solar dentro de sus procesos, estimándose que con un estudio costo-beneficio de la energía solar térmica y solar fotovoltaica aplicada al invernadero, objeto de estudio, es posible determinar cuál es la más adecuada para el funcionamiento del sistema de control. Debido al elevado costo de los combustibles convencionales, ya que la operación de mantenimiento de la temperatura dentro del invernadero se transforma en la limitante de este tipo de actividad, por lo que la evaluación económica del balance energético nocturno permite establecer la cantidad de energía necesaria para mantener en el ambiente interior un concluyente régimen térmico, el cual es idóneo desarrollar un correcto uso de las plantas (Attara, 2015).

1.1 Objetivos del trabajo.

1.1.1 Objetivo general.

En el marco de la producción agrícola del país, la necesidad de disminuir los costos de producción y aumento en la productividad de pequeños agricultores, resulta pertinente evaluar opciones de reducir o eliminar el alto consumo de LPG en invernaderos, ya sea para evitar las heladas o aportar el crecimiento de plantines.

1.1.2 Objetivos específicos.

- Evaluar opciones de calefacción de invernaderos del sector de Palquibudi (Rauco, Curicó), con cultivos de tomate, lechuga, repollos, brócoli, berenjena, apio, pimentón y pepino.
- Elaborar propuestas de proyecto factibles de ser presentados a fondos estatales para su implementación real por parte de los agricultores.
- Evaluar la incorporación de acumuladores de calor para aportar en la noche, en especial en épocas de heladas y sistemas de distribución homogénea del calor en el cultivo.
- Incorporar instrumentación de medición de parámetros de control
- Comparar costos de inversión y mantención de sistema solar o acumulación.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y BASE TEÓRICA.

2.1 Antecedentes

Los estudios que se han desarrollado alrededor del llamado efecto gases efecto invernadero que en Chile el 15% de las emisiones totales pertenecen a nivel nacional, además concluyen que los gases causantes del efecto principalmente son por la combustión de combustibles fósiles. Por ello, es necesario avanzar en ocuparlo de manera mucho más eficiente, dado que es preciso cambiar el rumbo de las políticas alimentarias y agrícolas hacia el fomento de sistemas agroecológicos (CIPER, 2020).

Dado el sector productivo en el cual se realiza este trabajo, se visualiza que, gran parte de los pequeños agricultores han visto incrementado los costos de producción, por el uso del combustible fósil el cual aumenta permanentemente, a la par del consumo alimentario por parte de la humanidad incrementando con ello aumentos en la producción de hortalizas, inclusive durante todas las estaciones del año.

Por lo anterior, el desarrollo del cultivo en invernaderos y la utilización de energías renovable se han vuelto de gran relevancia e importancia dentro del país, de ahí que se toman en cuenta datos de un sector netamente agrícola del país, siendo la localidad de Palquibudi en la comuna de Curicó, Región del Maule.

Como referencia de cultivos, se tomarán las verduras de alto consumo en el país como el tomate, lechuga, y con ello ver la factibilidad económica de la implementación de energías renovables, puntualmente el enfoque será energía solar.

2.2 Situación geográfica

La instalación del invernadero se realizará en el sector de Palquibudi de la comuna de Rauco, provincia de Curicó en la región del Maule.

Sus coordenadas son: (imagen de googlemaps de la localidad)

- 34°56'00''S
- 74°19'00''O

Las temperaturas promedio registradas se detallan en Tabla 2-5, en donde la temperatura más baja registrada se tomará como la temperatura nocturna del sector, la información fue obtenida del explorador de energía solar para autoconsumo.

	T° ambiente diurno [°C]	T° más baja registrada [°C]
Enero	19,6	13,6
Febrero	16,6	14,21
Marzo	16,6	13,6
Abril	12	11,6
Mayo	8,4	10,2
Junio	5,5	9,4
Julio	5,5	7
Agosto	7,1	6,6
Septiembre	9,1	7,3
Octubre	12,7	9,1
Noviembre	15,7	10,5
Diciembre	16	11,4

Tabla 2-1 Temperaturas promedio Rauco

2.3 Base Teórica: Energía Solar

De acuerdo al análisis a realizar, se ha de considerar que la fuente renovable para implementar en un proyecto de invernadero es la energía solar, por medio de la radiación solar que ingresa a la atmósfera. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, se denomina constante solar, y su valor medio es $1,37 \times 10^6$ erg/s/cm², o unas 2 cal/min/cm², ya que se considera que se modifica un 0,2% en un periodo de 30 años (Rosas, 2001). A continuación, se detallan, las radiaciones que emergen de la energía solar.

2.3.1 Radiación solar directa.

Es la radiación solar recibida en la superficie terrestre sin que sufra ningún cambio de dirección en su recorrido.

2.3.2 Radiación solar difusa.

Es la componente de la radiación solar recibida en la superficie después de que los procesos de reflexión y difusión de la atmósfera modifiquen su recorrido.

2.4 Sistemas Solares Térmicos.

Sistema Solar Térmico se entiende un conjunto de equipos y componentes que permite el aprovechamiento de la energía solar para la producción de agua caliente sanitaria para su uso en diferentes necesidades, ya que su principal equipo es un colector solar térmico y existen muchos tipos que, aunque en base tengan el mismo principio, tienen características diferentes. Por ello, se pueden clasificar como se presenta a continuación.

2.4.1 Clasificación.

2.4.1.1 En función del aprovechamiento solar

De manera general se realiza una primera clasificación de los colectores que pueden funcionar con energía solar global, que son en consecuencia estacionarios, y los colectores que únicamente funcionan con radiación solar directa, y que necesitan un sistema de seguimiento del recorrido del Sol a lo largo del día. A su vez, estos últimos colectores seguidores se subdividen en los que disponen de un único grado de libertad (absorbedores tubulares) y los que disponen de dos grados de libertad (absorbedores puntuales) (Duffie y Beckman, 2013).

2.4.1.2 En función de la temperatura del fluido

Esta división tiene en cuenta las temperaturas a las que puede llegar el fluido transportador, y, en consecuencia, las posibles aplicaciones que pueden aprovecharse de dichas temperaturas. Además, el tipo de fluido que se utilice determina el rango de temperaturas de operación del campo solar, lo que acaba por influir en la obtención del rendimiento del ciclo de potencia (Rojas et al, 2008).

- Temperatura baja (30-100[°C]). Este rango se consigue con colectores planos. Entre sus aplicaciones están las de calentamiento de aguas sanitarias y de

piscinas, calefacción, secado, desalinización y destilación. Estos sistemas son en general híbridos ya que casi siempre son usados con apoyo de otros tipos de energía como la eléctrica, pues que la energía solar no siempre está disponible, lo que puede ocasionar un paro en el servicio que se ofrece.

- Temperatura media (100-400[°C]). Se alcanzan con concentradores lineales o esféricos y se usan en procesos industriales (Industria láctea, procesado de residuos, etc.), así como en refrigeración, en procesos químicos (Producción de acetona) y de desalinización.
- Temperatura alta (400-3000[°C]). Estas altas temperaturas se alcanzan gracias a los concentradores puntuales como los de discos parabólicos y los campos de heliostatos o centrales de torre. Se utilizan en centrales solares foto térmica, fotovoltaica y fotoquímicas, también en hornos solares para tratamientos térmicos e investigación de materiales.

2.4.1.3 En función de la razón de concentración

Para esta clasificación, hay que introducir un nuevo parámetro, el factor o razón de concentración, denotado por la letra “C”. De manera que, se debe tomar en consideración dos elementos básicos dentro del colector, el concentrador y el receptor. El primero constituye el sistema óptico, y es la parte del colector que dirige la radiación sobre el receptor. Este es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y se convierte en otro tipo de energía (Osório y Carvalho, 2014).

Por tanto, la razón de concentración superficial se define como el cociente del área de apertura del concentrador entre el área de absorción del receptor.

2.4.1.4 Colectores no concentradores

Para las aplicaciones de baja temperatura se emplean siempre colectores solares sin concentración, donde $C=1$, ya que esto se debe a que las superficies de apertura y absorción

son iguales, es decir, todos los elementos del subsistema solar tienen el mismo emplazamiento físico. (Karagiorgas et al, 2010).

Este tipo de captadores no concentradores son, sin duda, los más utilizados en aplicaciones térmicas domésticas, dado que su coste y régimen de temperaturas permiten su adaptación a las necesidades del usuario de a pie. A su vez, se puede hacer una distinción dentro de los colectores no concentradores, atendiendo al fluido que circula por los tubos:

2.4.1.4.1 Captador plano para agua

En el ámbito doméstico y de bajas temperaturas, es el más utilizado para, por ejemplo, calentamiento de agua sanitaria, tal como lo muestra la Ilustración 2-1..



Ilustración 2-1 Captador plano para agua

2.4.1.4.2 Captador plano de aire

Tienen una respuesta rápida a la radiación, y no presentan problemas de congelación ni de corrosión, por lo que el proceso constructivo se simplifica, pues la estanqueidad del sistema para evitar cualquier fuga de fluido no supone una exigencia. Aun así, la Ilustración 2-2 muestra que el aire tiene una clara desventaja en comparación con el agua, pues el primero tiene una capacidad calorífica cuatro veces menor a la del agua, ya que una de las

aplicaciones más usuales en este tipo de captadores es la de su integración en las fachadas y techos de los edificios con objetivos energéticos (Fudholi et al, 2015).

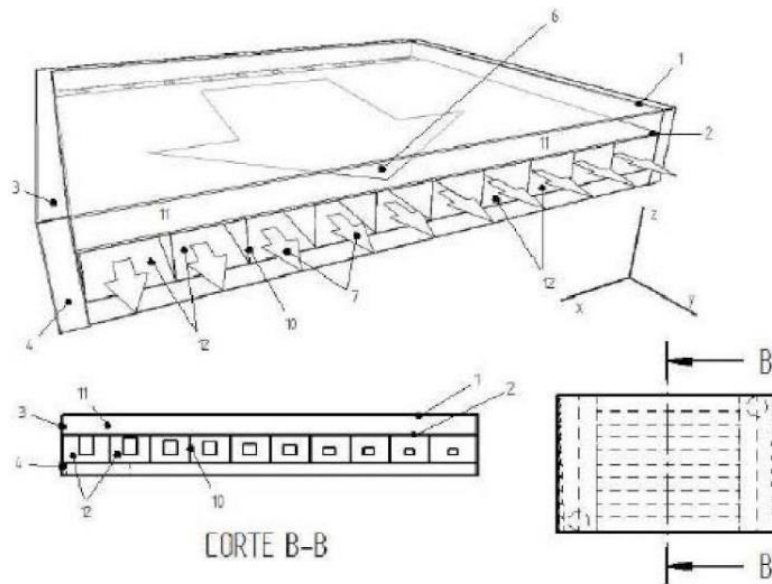


Ilustración 2-2 Captador plano de aire

2.4.1.4.3 Tubos de vacío

Aprovechan el vacío creado en su interior para eliminar las pérdidas por convección y aumentar así la temperatura del fluido portador de calor con menos necesidad de superficie de captación efectiva. Además, estos captadores se utilizan de forma individual, en grupos, en haces o en sistemas de concentración lineal, como lo muestra la Ilustración 2-3 (Tang, Yang y Gao, 2011).



Ilustración 2-3 Tubos de vacío

2.4.1.4.4 Colectores concentradores

Para poder alcanzar mayores temperaturas en un colector, es necesario modificar el sistema de captación, de forma que se aumente la concentración, ya que esto se consigue en los colectores concentradores, que se pueden clasificar según dos características básicas: la geometría del absolvedor (concentración lineal o puntual) y la forma de la concentración (reflexión o refracción). Aun teniendo en cuenta esta primera clasificación, todos ellos pueden concentrar la energía solar en un punto específico para conseguir temperaturas muy elevadas que pueden cubrir las aplicaciones industriales, tales como generación de electricidad (Venegas, 2008).

A modo de resumen, se adjunta la Ilustración 2-4, donde se muestran los diferentes colectores en función de la razón de concentración, se añaden, además, el rango de temperaturas a las que se puede llegar:

Model No. & Specs		FP3.0-G	Reference Photo
Overall Data	Collector dimension(mm)	2000*1250*95	
	Overall area(m2)	2.5	
	Aperture area(m2)	2.3	
	Absorber area(m2)	2.17	
	Fluid capacity(liter)	2.2L	
Absorber	Header dimension(mm)	Ø22	
	Welding way	Laser welding	
	Max. working pressure	0.8Mpa	
	Absorber material	Full Aluminum plate	
	Absorber coating	Blue selective coating	
	Absorption	95%	
	Emittance	5%	
Insulation	Insulation material	Fiber glass	
	Insulation thickness(mm)	back:50	
Glazing	Transmittance	92%	
	Material	3.2mm Low iron tempered textured glas	
Casing	Frame	Anodized aluminum alloy	
	Back plate	Aluzinc steel	
	Sealing gasket	EPDM	
Overall weight	Net weight(kg)	48	
Container loading			
Certification	Solar Keymark certified		

Ilustración 2-4 Colectores concentradores

2.4.1.4.5 Colector parabólico compuesto

Fundamentalmente consta de reflectores parabólicos que redirigen la radiación desde la apertura hasta el absorbente, como si se tratase de un embudo, es decir, todos los rayos incidentes son dirigidos al absorbedor. En la Ilustración 2-5, las mitades derecha e izquierda pertenecen a diferentes parábolas. El eje derecho de la parábola forma un ángulo θ a con el plano medio del colector y el eje izquierdo forma un ángulo $-\theta$ a con dicho plano, y sus focos son A y B respectivamente (Vidriales, 2007).

En los puntos C y D la inclinación es paralela al plano medio del colector.



Ilustración 2-5 Colector parabólico compuesto

Una de las características angulares de este diseño, es que todos los rayos que inciden sobre la apertura con ángulo de aceptación angular, que sean $|\theta| > \theta$ a serán reflejados entre las dos superficies y expulsados al exterior. Esta propiedad implica que la concentración (si se asume que la reflectividad es igual a 1) es igual al límite termodinámico.

Las ventajas que estos diseños ofrecen se pueden resumir en las siguientes:

- La concentración es independiente de la forma del absorbente, sino que depende del perímetro y del ángulo de aceptación de este.
- La restricción de los ángulos de salida del receptor. Es importante porque algunos receptores tienen poca absorbencia a ángulos de incidencia altos.
- Permiten la orientación asimétrica de la fuente y la apertura (para diseños de colectores que presentan variaciones estacionales). Aunque también pueden ser no seguidores
- Aprovechan la radiación difusa.
- Pueden ser usados para re concentradores o concentradores secundarios con altos rendimientos.

Con todo ello, el uso de este tipo de colector no es muy común, pues no se ha investigado lo suficiente.

2.4.1.4.6 Colector cilindro parabólico

Existen diversos campos solares que usan esta tecnología con el fin de generar energía térmica y eléctrica, ejemplos de ellos son la Plataforma Solar de Almería Andasol 1 y Andasol 2, ya que esta tecnología está muy avanzada, la información y exactitud es amplia y detallada. Asimismo, los CCP's son captadores concentradores solares de foco lineal, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo que puede llegar hasta los 400[°C] en casos muy favorables, por lo que están englobados dentro de los colectores solares de media temperatura (Zarza, 2003).

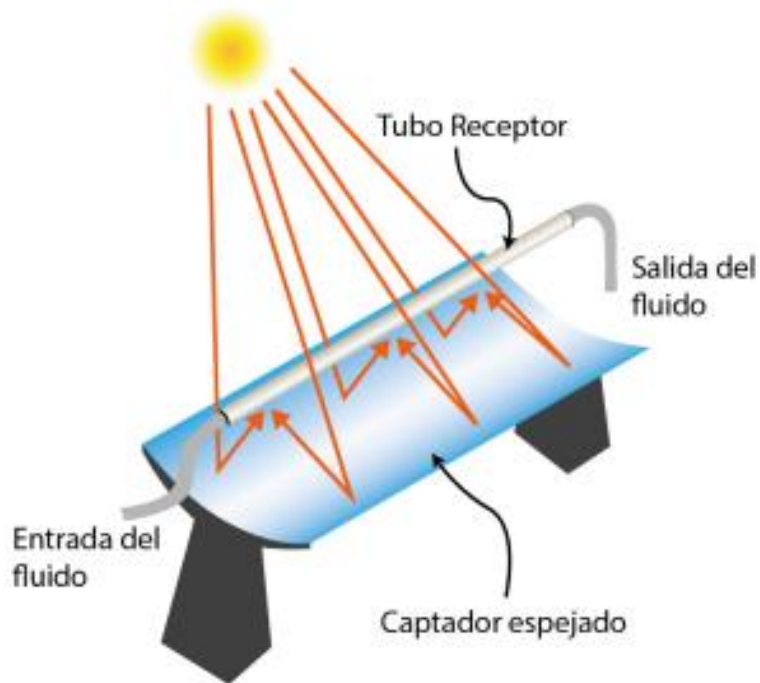


Ilustración 2-6 Esquema de un CCP con sus partes y funcionamiento

2.4.1.4.7 Disco parabólico

Los sistemas de discos parabólicos se componen de un reflector o un conjunto de reflectores, que tienen forma de paraboloide de revolución, ya que poseen un receptor situado en el foco puntual de dicho paraboloide, y de un sistema de generación eléctrica compacto,

un motor o una turbina más un alternador. Además, como receptor y sistema de generación suelen formar parte de un mismo conjunto, dado que el principio de funcionamiento es el mismo que para los CCP's, es decir, la radiación concentrada por el paraboloide incide sobre el receptor, donde se convierte energía térmica (pudiendo alcanzar los 1500[°C]) que permite generar electricidad (López, 2016).

2.4.1.4.8 Sistema de torre central

Este sistema está compuesto por un grupo de concentradores planos individuales llamados heliostatos, los cuales direccionan la radiación solar agrupada hacia un receptor central situado en lo alto de una torre. Por tanto, la concentración de la radiación se produce en tres dimensiones, por lo que el valor de la razón de concentración es muy elevado, así como las temperaturas que se alcanzan, pudiendo llegar estas a los 1500 [°C] (Losada, 2009).

2.5 Sistema de acumulación.

2.5.1 Aerotermos

Estos sistemas, utilizan agua caliente como fuente de calor, un intercambiador de calor agua-aire con aletas y un ventilador para calentar aire. Si bien no generan calor de forma autónoma, son sumamente útiles cuando se implementan junto con sistemas de calefacción por agua caliente como calderas.



Ilustración 2-7 Imagen referencial de aerotermostato

2.5.2 Recuperadores de calor

En calderas, se puede aprovechar el calor de los gases de escape, mediante un intercambiador de calor o mediante la extracción de parte de los gases cuando se utilizan combustibles gaseosos, donde además del aporte calórico también existe un aporte carbónico aprovechable para el cultivo.

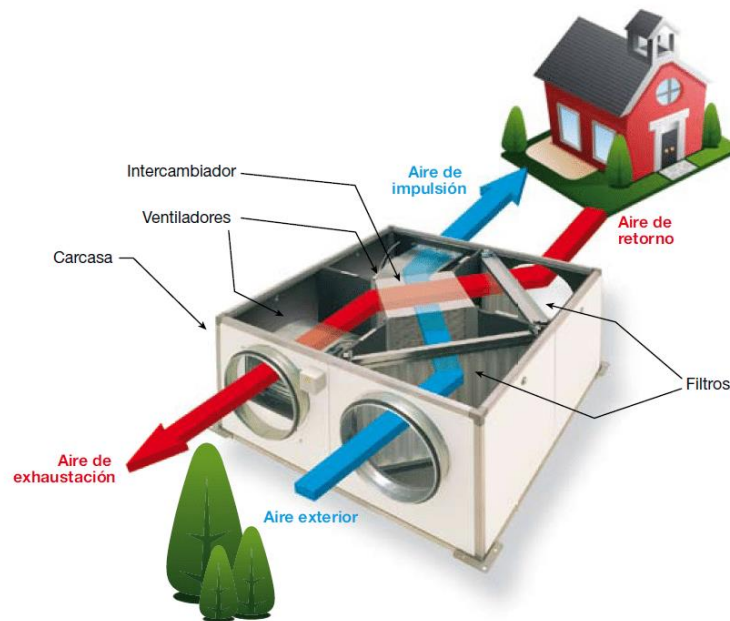


Ilustración 2-8 Imagen referencial de recuperador de calor

2.5.3 Acumulador de calor en lecho de piedras

Un lecho de piedras es un contenedor en donde se colocan piedras de pequeño tamaño y con conductos de entrada y salida de aire. En los lechos convencionales el flujo de aire se mantiene en un sentido durante la carga y en sentido opuesto durante la descarga, con el propósito de aprovechar la estratificación de temperatura dentro de los mismos.

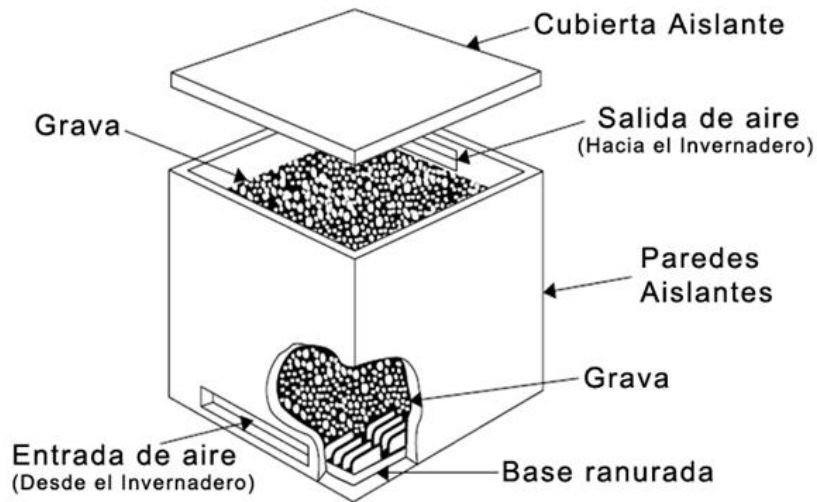


Ilustración 2-9 Imagen referencial lecho de piedras

2.5.4 Quemador de biomasa

El equipo es un quemador con doble cámara, una para la combustión y otra para la circulación de los gases de combustión que luego irán a la chimenea, por el exterior del equipo se tienen placas a modo de aletas para aumentar la transferencia de calor al aire que rodea el equipo y reduce las emisiones contaminantes neutras de CO₂ (Cengel, 2007).

2.6 Invernadero.

El invernadero es una estructura variable tamaño y forma recubierta de vidrio, plástico u otros materiales impenetrables, ya que el agua y la radiación infrarroja al quedar atrapada retienen el calor en su interior para beneficiar al aumento de las plantas. Asimismo, el invernadero posee una ventaja como es la de lograr obtener escenarios artificiales de microclima para cultivar plantas externamente de la cosecha en contextos recomendables, admitiendo logrando una elevada producción, a bajo costo, en menor tiempo, sin daño ambiental, resguardándose de las lluvias, granizo, heladas, insectos y excesos de viento que consiguieran afectar a la recolección (Rodríguez, 2002).

Las estructuras de los invernaderos poseen circunstancias apropiadas para mantener la ligereza y resistencia, es de material económico y fácil conservación, idóneo para su

ampliación y flexibles a los materiales de la cubierta. Por otro lado, los invernaderos alteran su diseño según su techumbre, tal como se observa en la Ilustración 2-10 que presentan diversos tipos de techos y cubiertas (Licona y Copado, 2016).



Ilustración 2-10 Tipos de techos y cubiertas para invernaderos

2.6.1 Construcción

2.6.1.1 Clases de invernaderos

2.6.1.1.1 Capilla

El techo forma uno o 2 planos inclinados. Es el invernadero más común dadas sus características:

- Fácil construcción.
- Fácil mantenimiento.
- Alta adaptabilidad al material que lo recubre.
- Posibilidad de instalación de ventilación en las paredes.
- Permite ampliación.

Para el dimensionamiento de este tipo de invernaderos se suele utilizar entre 12-16 [m] de ancho y 3,25-4 [m] de altura. Respecto a la inclinación que de la techumbre es sobre los 25° para así no presentar problemas con la evacuación de aguas lluvias. Se pueden utilizar ventanas frontales y laterales para la ventilación (Leal, 2015).

Para estructuras en serie, naves unidas, puede verse dificultada la ventilación debido a ausencia de ventanas cenitales.



Ilustración 2-11 Invernadero capilla

2.6.1.1.2 Doble capilla

Este invernadero cuenta con la unión de 2 naves. Su ventaja es la mejora que significa en la ventilación interior del invernadero, al poseer ventilación vertical en las paredes. En desventaja es su difícil construcción respecto a los demás y su mayor valor.

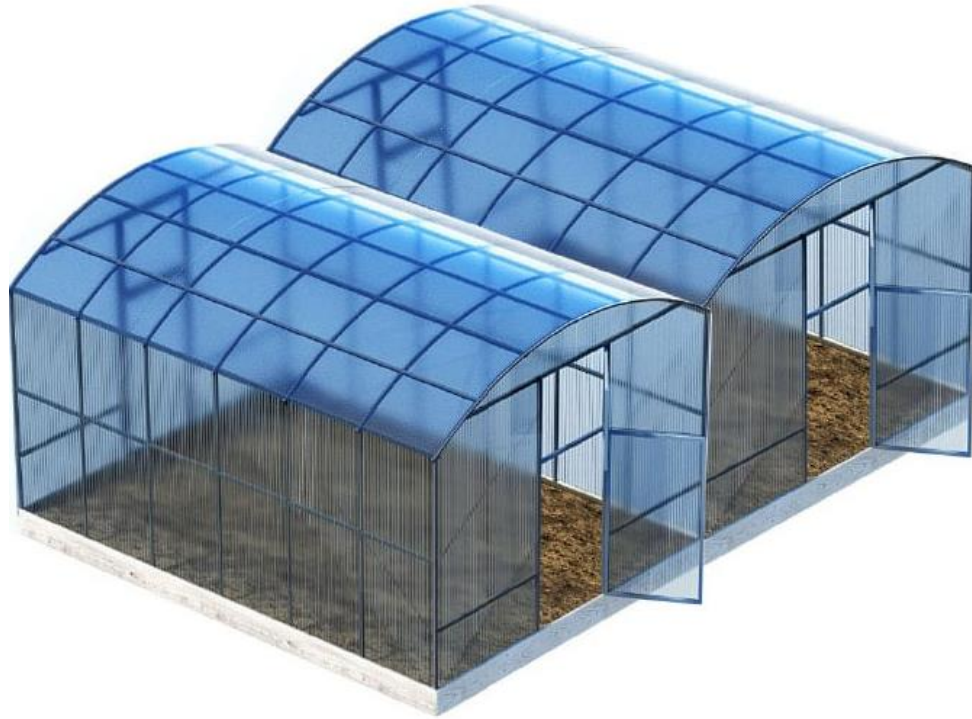


Ilustración 2-12 Invernadero doble capilla

2.6.1.2 Materiales ocupados en la armadura

Para Marín, (2013) la armadura de un invernadero está compuesta por vigas, cables, correas etc., que dan soporte a la cubierta que protege del viento, lluvia, entre otros, además de contener los elementos de control, tomando en consideración que debe ser ligera, resistente, de fácil manipulación, esbeltas y adaptables. Por otro lado, unos puntos importantes al considerar la estructura es el sombreado y la movilidad interna, el primer punto es importante que se mantenga al mínimo posible para no afectar el desarrollo de los vegetales y lo segundo debe procurar una amplia libertad para el trabajo (Gassó y Solomando, 2011).

Dentro de los materiales considerados para la estructura encontramos madera, hierro, aluminio, alambre galvanizado y hormigón armado, todos estos elementos deben encontrar la configuración ideal entre solidez y economía para así definir el tipo de invernadero a construir. Siendo usualmente un mix de estos materiales.

2.6.2 Cubierta

Es un elemento esencial al momento del diseño dado el impacto que tiene en el proceso térmico dentro. Es por ello que la cubierta debe tener muy baja transmisividad a la radiación infrarroja (Medina y Lardizabal, 2011).

2.6.3 Ventajas y desventajas de la implementación de un invernadero.

2.6.3.1 Ventajas

- Producción en otra época de cosecha.
- Mejoramiento en el rendimiento y calidad de lo cultivado.
- Precocidad en el cultivo.
- Mejor control de enfermedades (insectos, entre otros)
- Ahorro en agua y fertilizante.

2.6.3.2 Desventajas

- Alta inversión al inicio del proyecto.
- Elevado costo de operación.
- Personal especializado.

2.6.4 Dimensiones de invernadero

Las dimensiones del invernadero es un factor de gran relevancia, ya que intervendrá en la inercia térmica del sistema, evitando cambios violentos de temperatura (Ramos, 2011). Para el estudio de la presente tesis se utilizará un invernadero por verdura estudiada, por lo tanto, la cantidad de invernaderos construidos será un total de 8. A continuación, las siguientes dimensiones son las consideradas para el diseño de un invernadero, por lo tanto, para el estudio final se amplificará en 8 veces para lograr lo necesario.

Dimensión		Valor [m]
Ancho	x	7,5
Largo	L	20
Alto	h	3,5

Tabla 2-2 Dimensiones de invernadero

Fuente: Elaboración propia

$$A_{\text{útil}} = x * L * 0,9^1$$

Ecuación 1

Área útil para plantación= 135 [m²].

$$V_{\text{Aire}} = x * L * h$$

Ecuación 2

Volumen de aire contenido= 525 [m³].

$$m_{\text{Aire}} = V_{\text{Aire}} * \rho_{\text{Aire}}^2$$

Ecuación 3

Masa de aire contenido= 632,63 [kg].

¹ Se considera un 10% de área utilizada para pasillos.

² Densidad considerada a 25[°C] NTP 1,205

2.7 Variables climáticas

Para el cálculo de los requerimientos energéticos para climatizar el invernadero se deben considerar las condiciones internas como las condiciones a las que está expuesto, considerando la intensidad de radiación solar, temperatura, humedad relativa y dirección y velocidad de viento.³ De manera que, la variable principal que se considera es la temperatura externa o ambiental, para con esta desarrollar el balance energético requerido para calefaccionar (Marín, 2013).

Para ello se pueden considerar distintos valores de temperatura externa para el diseño de los sistemas de calefacción, entre los que se pueden encontrar:

- Temperatura media mensual del mes más cálido.
- Temperatura media de las máximas diarias del mes más cálido.
- Temperatura máxima absoluta del año.
- Temperatura media mensual del mes más frío.
- Temperatura media de las mínimas mensuales.
- Temperatura mínima absoluta de año.

Para el efecto de esta tesis, se utilizó la temperatura media de las mínimas mensuales.

2.7.1 Temperatura

Para Bouchet et al. (2007) uno de los factores que determinan la actividad del metabolismo, crecimiento, morfología y del desenvolvimiento de la planta es la temperatura, ya que se debe tener en consideración las limitaciones y necesidades de los elementos cultivados. Son 2 parámetros que se deben tener mayor preocupación a la hora de controlar la temperatura, ellos son:

- Temperatura biológica (máxima y mínima): Son aquellos valores que determinan el alcance de una etapa vegetativa, tal como la vegetación, floración, etc.

³ No se medirá en esta tesis.

- Temperatura diurna y nocturna: aquellos valores para el correcto desenvolvimiento vegetal en distintos horarios.

2.7.2 Humedad relativa

Este factor se relaciona directamente con el rendimiento de los vegetales cultivados. Puesto que su elevado valor reduce la transpiración vegetal y ello reduce el crecimiento, inclusive pudiendo producir abortos vegetales dado el aumento de hongos y bacterias que causan enfermedad en lo cultivado. En caso contrario un valor bajo causa deshidratación por exceso de transpiración (Baeza et al. (2009).

2.7.3 Radiación luminosa

Un componente que se deriva como esencial para el efecto de fotosíntesis, es el proceso de síntesis orgánica de los vegetales que tienen clorofila, ya que el principal proveedor de energía radiante es el sol mediante los rayos ultravioleta. La radiación oscila entre los 400-700 [nm] y es conocida como “radiación fotosintética activa”, desde ahora PAR (por sus siglas en inglés) (Farzaneh-Gord et al., 2013).

De las dimensiones que se deben destacar dentro de la radiación y éstas son: intensidad de la luz y el fotoperiodo, donde la primera se encarga de la maximización del crecimiento y la segunda del metabolismo. Por ende, es un factor importante que debe ser controlado para así sacar mayor provecho.

2.7.4 Concentración CO₂

El nutriente más importante de los vegetales es el carbono, alrededor de un 40% de la planta se compone de éste. Este elemento se incorpora a la planta a través del CO₂ presente en la atmósfera con el proceso de fotosíntesis (Marabesi, 2007). Para efecto de esta memoria la concentración no será medida.

2.8 Frutas y verduras.

Para la FAO (2006) la variedad y cantidad son importantes en el momento de absorber las frutas y verduras, ya que estas dos variables acordadas están relacionadas a obtener una mejor calidad de la dieta en las personas. Tal como se planteó anteriormente, para esta tesis se utilizarán las verduras de mayor consumo en el país, es por ello que a continuación se describirán sus principales características, siendo meramente informativo.

2.8.1 Tomate

Para Gázquez (2008) el origen del género *Lycopersicon* se localiza en la región andina que se extiende desde el sur de Colombia al norte de Chile. Probablemente desde allí fue llevado a Centroamérica y México donde se domesticó y ha sido por siglos parte básica de la dieta. Luego, fue llevado por los conquistadores a Europa.

2.8.1.1 Taxonomía y Morfología

Pertenece a la familia Solanaceae, correspondiente a la especie *Lycopersicon esculentum* Mill. El tomate cultivado corresponde, básicamente, a *L. esculentum*, aunque también se cultiva una fracción de la variedad botánica cerasiforme y de *Lycopersicon pimpinellifolium* ("cherry", "cereza", o "de cóctel"). El mejoramiento ha generado muchas variedades distintas para fines muy específicos (Gázquez, 2008).

2.8.2 Lechuga

El origen de la lechuga no parece estar muy claro, aunque algunos autores afirman que procede de la India, aunque hoy en día los botánicos no se ponen de acuerdo, por existir un seguro antecesor de la lechuga, *Lactuca Scariola*, que se encuentra en estado silvestre en la mayor parte de las zonas templadas. El cultivo de ésta se remonta a una antigüedad de 2.500 años, siendo conocida por griegos y romanos (Vallejo y Estrada, 2004).

2.8.2.1 Taxonomía y morfología

La lechuga es una planta anual y autógena, perteneciente a la familia Compositae y cuyo nombre botánico es *lactuca sativa* L. La raíz no llega a sobrepasar los 25 [cm] de profundidad, es pivonante corta y con ramificaciones. Las hojas colocadas en roseta, desplegadas al principio; en unos casos siguen así durante todo su desarrollo (variedades romanas), y en otros se acogollan más tarde. Los bordes de los limbos pueden ser lisos, ondulados o aserrados. El tallo es cilíndrico y ramificado (Vallejo y Estrada, 2004).

Las variedades de lechuga se pueden clasificar en:

- Romanas
- Acogolladas
- De hojas sueltas.
- Lechuga esparrago.

2.8.3 Pepino

Para la Horticultura Efectiva (2014) el pepino es originario de las regiones tropicales del sur de Asia, siendo cultivado en la India desde hace más de 3.000 años. De la India se extiende a Grecia y de ahí a Roma, siendo Cristóbal Colón quien introdujo el cultivo a América.

2.8.3.1 Taxonomía y morfología.

Familia Cucurbitaceae de la especie *Cucumis sativis*. Planta herbácea anual. Su sistema radicular es muy potente, dada la gran productividad de la planta y consta de raíz principal que se ramifica rápidamente para dar raíces secundarias superficiales muy finas, alargadas y de color blanco. El talo principal es anguloso y espinado, de porte rastrero y trepador. Posee una flor de corto pedúnculo y pétalos amarillos. Finalmente, el fruto es pepónide áspera o liso, dependiendo de la variedad, que vira desde un color verde claro a un verde oscuro, hasta alcanzar un color amarillento cuando está totalmente maduro Horticultura Efectiva, 2014).

2.8.4 Coliflor

Según la FAO (2009) los tipos cultivados de Brassica oleracea se originaron a partir de un único progenitor silvestre. Esta fue llevada desde las costas atlánticas hasta el mediterráneo. De esta manera, aunque la evolución y selección de los distintos tipos cultivados tuvo lugar en el mediterráneo oriental.

2.8.4.1 Taxonomía y morfología

Para la FAO (2009) la coliflor es una planta perteneciente a la familia Cruciferae y cuyo nombre botánico es Brassica Oleracea. Estas plantas la inflorescencia se encuentra hipertrofiada, formando una masa de pecíolos y botones foliares apelmazados. Las selecciones de coliflores tienen los soportes de la flor desarrollados prematuramente, las flores abortan en gran parte y las ramificaciones a lo largo de las cuales están distribuidas se encuentran engrosadas y disminuyendo la longitud, formando una especie de corimbo regular que termina en una superficie blanca amontonada. Es decir, las ramificaciones florales gruesas, blancas, más o menos apretadas pero unidas forman una masa que es la cabeza de la coliflor. Se consideran coliflores las coles de pella compacta que no forman brotes laterales y son de color blanco.

En el cultivo se reconocen las siguientes fases:

- Juvenil.
- Inducción floral.
- Crecimiento de la pella.

La fase juvenil queda definida como aquel periodo en el que la planta no responde a la acción de las bajas temperaturas que provocan la inducción floral, estando marcada su duración por la formación de un número determinado de hojas.

2.8.5 Berenjena

Según Aramendiz et al. (2006) la berenjena es originaria de zonas tropicales y subtropicales asiáticas. Se cultivó desde hace mucho en la India, Birmania y China. Hacia el 1200 se empezó a incorporar a Egipto y Europa.

2.8.5.1 Taxonomía y morfología

Pertenece a la familia Solanaaceae de la especie *Solanum melongena*. Es una planta herbácea, aunque sus tallos presentan tejidos lignificados que le dan un aspecto arbustivo. Es una planta anual, aunque puede presentar un rebrote en el mismo si se cuida y poda de manera adecuada, ya que su sistema radicular es muy potente y muy profundo. Los tallos son fuertes y crecimiento determinado cuando se trata de tallos rastreros que dan a la planta un porte abierto, o de crecimiento indeterminado cuando son erguidos y erectos, pudiendo alcanzar 2-3 [m] de altura (Aramendiz et al., 2006).

Además, las hojas son de largo pecíolo, entera, grande y con nerviaciones que presentan espinas y envés cubierto de una vellosidad grisácea. En cuanto a la flor se tiene que el número de pétalos oscila entre 6 y 9, son de color violáceo, es decir, tanto el pedúnculo como el cáliz poseen abundantes espinas, aunque se tiende al cultivo de variedades sin espinas. Por tanto, los estambres presentan anteras muy desarrolladas de color amarillo que se sitúan por debajo del estigma, dificultando la fecundación directa, puesto que la mayor parte de las variedades florecen en ramilletes de 3 a 5 flores, una de las cuales es hermafrodita y de pedúnculo corto y que da al fruto comercial. El fruto es una baya alargada o globosa de color negro, morado, blanco o verde (Robles et al., 2004).

2.8.6 Apio

Para Choque (2021) el apio es una planta procedente del mediterráneo, existiendo otros centros secundarios como el Cáucaso y la zona del Himalaya.

2.8.6.1 Taxonomía y morfología

Pertenece a la familia Ubeliferae, se distinguen 2 variedades botánicas, *Apium Graveolens* dulce y *rapaceum*, de este último es el apio-nabo. Tiene raíz pivotante, potente y profunda, con raíces secundarias superficiales. Del cuello de la raíz brotan tallos herbáceos que alcanzan los 30-80 [cm] de altura. Las hojas son grandes con forma de corona, el pecíolo es una penca muy gruesa y carnosa que se prolonga en gran parte del limbo (Choque, (2021).

2.8.7 Pimentón

Es originario de la zona de Bolivia y Perú, donde además de *Capsicum Annuum* se cultiva al menos otras 4 especies. Luego del primer viaje de Colón a América fue introducido a Europa (Berrones et al., 2013).

2.8.7.1 Taxonomía y morfología

Pertenece a la familia Solanacea de la especie *Capsicum*, Es una planta herbácea perenne, con un ciclo de cultivo anual variable entre los 0,5-2 [m]. Su sistema radicular es pivotante y profundo, con numerosas raíces adventicias que alcanzan una longitud entre 0,5-1 [m]. Las hojas son lampiñas, lanceoladas, con un ápice muy pronunciado y con un pecíolo largo y poco aparente. El haz es glabro y de color verde y brillante. Las flores aparecen solitarias en cada nudo de la talla con inserción en las axilas de las hojas, son pequeñas y constan de una corola blanca. El fruto es una baya hueca, semi cartilaginosa y deprimida, de color variable, su peso llega hasta los 0,5 [kg] (Berrones et al., 2013).

2.8.8 Brócoli

El brócoli es originario de Italia, de las costas del Mediterráneo, donde se extendió a través de Europa y todo el mundo de esta planta proveniente de una especie silvestre, común entre coles y coliflores (Arellano, 2020).

2.8.8.1 Taxonomía y morfología

El brócoli pertenece a la familia de las Crucíferas y su nombre botánico es *Brasica oleracea*, variedad *italica*, ya que es una planta herbácea de hasta 70 cm de altura, de tallo succulento único, es decir, sin ramificaciones, es de hoja amplia laminar follor, dentadas, cerosas, de color verde oscuro, con entrenudos cortos lo que da forma a la planta. Además, la raíz es pivonante con raíces secundarias y superficiales. Sus flores con de color amarillo, dado que es similar a la coliflor, aunque la pella (conjunto de tallitos) que forma es más pequeña (Arellano, 2020).

2.8.9 Repollo

Para Sandoval (2020) el repollo tiene su origen en una amplia zona de Europa, aunque siempre en zonas de costeras. Actualmente, el más cultivado es el repollo blanco, pero no quita importancia a las otras variedades existentes, entre ellas el repollo morado.

2.8.9.1 Taxonomía y morfología

El repollo (o también conocida como col), también pertenece a la familia de las crucíferas y su nombre botánico es *Brasica oleracea*, variedad *capitata*.

El tallo del primer año, no presenta ramificaciones y generalmente no alcanza los 30 cm de logitud, crecimiento que se detiene en el estado de desarrollo inicial. El crecimiento continúa formando sus hojas, siendo las primeras de unos 45 cm de largo por unos 35 cm de ancho (dimensiones a considerar al momento de sembrar). Posteriormente, se producen las hojas que se despliegan parcialmente, para comenzar a formar una especie de caparazón. Por la continua formación y crecimiento de sus hojas jóvenes, se forma la cabeza compacta de hojas, que corresponde a la hortaliza de consumo de esta variedad (Sandoval, 2020).

Verdura	Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura desarrollo óptimo [°C]	Humedad relativa [%]
Tomate	18	27	21-24	60-80
Lechuga	15	23	18-20	90-95
Pepino	14	40	20-30	60-70
Repollo	5	25	15-20	80-90
Coliflor	5	26	15-21	85-95
Brócoli	0	30	16-20	60-75
Berenjena	12	30	20-25	50-65
Apio	5	30	15-20	95-100
Pimentón	14	30	18-24	75-85

Tabla 2-3 Temperatura y humedad de las verduras

Fuente: Elaboración propia

2.9 Sistema de control

2.9.1 Sistemas de calefacción

Para Körner y Challa (2003) existen 2 formas de calefacción de un invernadero, ya sea por convección al calentar el aire del interior o por conducción a través de cañerías a ras de cultivos. Actualmente los sistemas más utilizados de convección son:

- Tuberías agua caliente.
- Aerotermos.
- Generadores de aire caliente.
- Generadores y distribución, por manga de polietileno, de aire caliente.

Los más utilizados de conducción son:

- Tuberías a ras de suelo
- Tuberías enterradas
- Banquetas

Por su parte, Marín et al. (2016) señala que la calefacción por agua caliente es la más tradicional y trata de circulación de un fluido caliente producto de un foco calorífico distribuido por una red de tuberías. El fluido se calienta al agregar valor y las tuberías se colocan a 10 [cm] del suelo, éstas serán fijas. Para la regulación de la temperatura dentro del invernadero se pueden ocupar 2 métodos:

- Termo fusión: que contempla tuberías de gran diámetro y con ligera pendiente.
- Impulsado por bomba: que contempla tuberías de diámetro pequeño y con temperatura mayor que el primer método.

Adicionalmente, Dorais et al. (2001) sostienen que en el sistema de calefacción por tuberías a ras de suelo por fluido caliente se pueden destacar las siguientes características:

- Temperatura del aire interior más homogénea.
- Se necesita temperaturas menores obtenidas desde el panel solar.

- Mayor gasto en bombeo.
- Menor gasto en material de tuberías.
- Costos de instalación elevados.



Ilustración 2-13 Sistema de calefacción

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE INGENIERÍA.

3.1 Dimensionamiento energético.

Para la tesis se considerarán las siguientes suposiciones:

- El flujo de aire en el lecho de roca es unidireccional.
- No hay conducción axial o dispersión del calor, en el lecho de roca.
- Las propiedades físicas de las piedras son constantes durante el proceso.
- No hay transferencia de masa.
- No se considera pérdidas de calor con el exterior, en el lecho de rocas.
- No hay gradiente de temperatura en la piedra.
- Se considerará una única temperatura máxima en los 8 invernaderos, tomando los 24[°C], puesto que con ello se logrará el requerimiento para cada una de las verduras.
- Las propiedades de las verduras en cuanto a los requerimientos de humedad, CO₂, tipo de tierra, etc. No se considerarán.
- La distribución de la temperatura adentro del invernadero es homogénea.

3.1.1 Datos técnicos panel solar

Dentro de los datos técnicos del panel de control se tiene:

Eficiencia del colector es un 70%.

Dimensión del colector 2,17 m².

Colector de placa intermedia– En este modelo la placa se encuentra situado en medio de la caja, realizándose la circulación de ida por detrás y la de retorno por delante del absorbedor o viceversa.

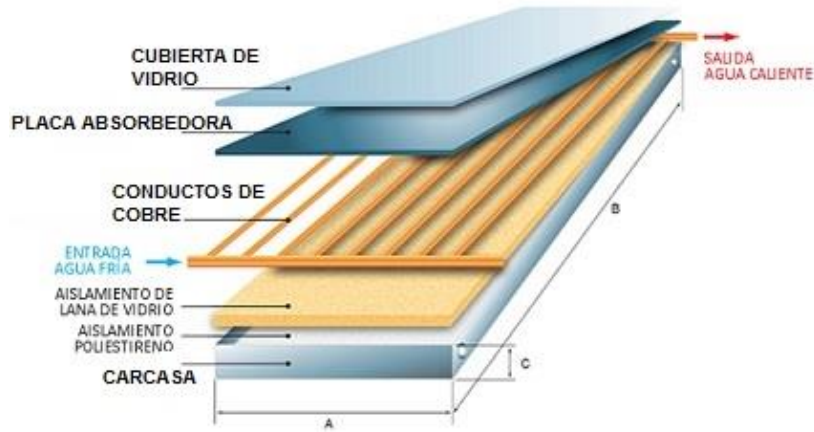


Ilustración 3-1 Datos técnicos del panel solar

3.1.2 Aporte calórico

Para el cálculo del aporte calórico requerido para mantener una temperatura promedio de 24 [°C] en 8 invernaderos separados:

$$DDA = m_{aire} * (T_{Trab} - T_{Amb}) [kJ]$$

Ecuación 4

Ecuación 3. 1

$$DDA_1 = DDA / 3600 [kWh]$$

Ecuación 5

Ecuación 3. 2

$$RGM = \frac{\text{Radiación Solar Global}}{\text{días}_{mes i}}$$

Ecuación 6

Ecuación 3. 3

$$A = \frac{DDA_1}{RGM} [m^2]$$

En la Tabla 3-1 se presentan los datos de la radiación solar tanto global como difusa, los datos fueron obtenidos de CNE/PNUD/UTFSM (2008), en donde se puede destacar que

el mes con menor radiación, y por ende aporte al sistema, es junio y que coincide con el mes con menor temperatura y es donde más se necesita el aporte energético.

	Rad solar Global [kWh/m²]	Rad solar Difusa [kWh/m²]	RGM [kWh/m²] diario
Enero	231,2	77,26	7,46
Febrero	193,15	64,25	6,90
Marzo	161,89	59,14	5,22
Abril	106,74	46,18	3,56
Mayo	70,56	33,61	2,28
Junio	45,8	28,08	1,53
Julio	58,62	30,7	1,89
Agosto	78,3	39,26	2,53
Septiembre	111,32	55,94	3,71
Octubre	150,22	72,08	4,85
Noviembre	186,84	79,5	6,23
Diciembre	220,26	85,67	7,11

Tabla 3-1 Radiación solar

Rad generado por SST [kWh]	[kCal/mes]
501,7	431.465
419,1	360.457
351,3	302.119
231,6	199.198
153,1	131.679
99,4	85.472
127,2	109.397
169,9	146.123
241,6	207.745
326,0	280.341
405,4	348.681
478,0	411.049

Tabla 3-2 Rad generado por SST [kWh]

Demanda [kJ]	Demanda [kWh]	Área [m²]	Cantidad de colectores
7.895,16	2,19	0,42	1
7.432,08	2,06	0,43	1
7.895,16	2,19	0,60	1
9.413,46	2,61	1,05	1
10.476,27	2,91	1,83	1
11.083,59	3,08	2,88	2
12.905,55	3,58	2,71	2
13.209,21	3,67	2,08	1
12.677,81	3,52	1,36	1
11.311,34	3,14	0,93	1
10.248,53	2,85	0,65	1
9.565,29	2,66	0,53	1

Tabla 3-3 Demanda [kJ]

Mes	Demanda kJ	Demanda kWh	Área [m²]	Total de Colectores
Enero	63.161,78	17,54	3,36	2
Febrero	59.457,10	16,52	3,42	2
Marzo	63.161,78	17,54	4,80	3
Abril	75.308,28	20,92	8,40	4
Mayo	83.810,82	23,28	14,61	7
Junio	88.669,42	24,63	23,05	11
Julio	103.245,22	28,68	21,67	10
Agosto	105.674,52	29,35	16,60	8
Septiembre	101.423,24	28,17	10,85	5
Octubre	90.491,40	25,14	7,41	4
Noviembre	81.988,85	22,77	5,22	3
Diciembre	76.522,92	21,26	4,27	2

Tabla 3-4 Meses

Según los datos presentados en las tablas para el mes más crítico, junio, se necesitarían 11 colectores para suplir el 100% de requerimientos energético. Siendo solamente 2 paneles en los meses de mayor temperatura.

3.1.3 Pérdidas

Para la presente investigación se considera un 20% de la energía se pierde en todo el proceso, por lo tanto, para lograr el requerimiento energético mínimo se debe suplir lo necesario por la pérdida. Además, se considera alrededor de un 20% de pérdida de calor en el invernadero. Agregar un valor promedio de perdida (ya sea por el invernadero mismo o por el sistema de acumulación) 20% app

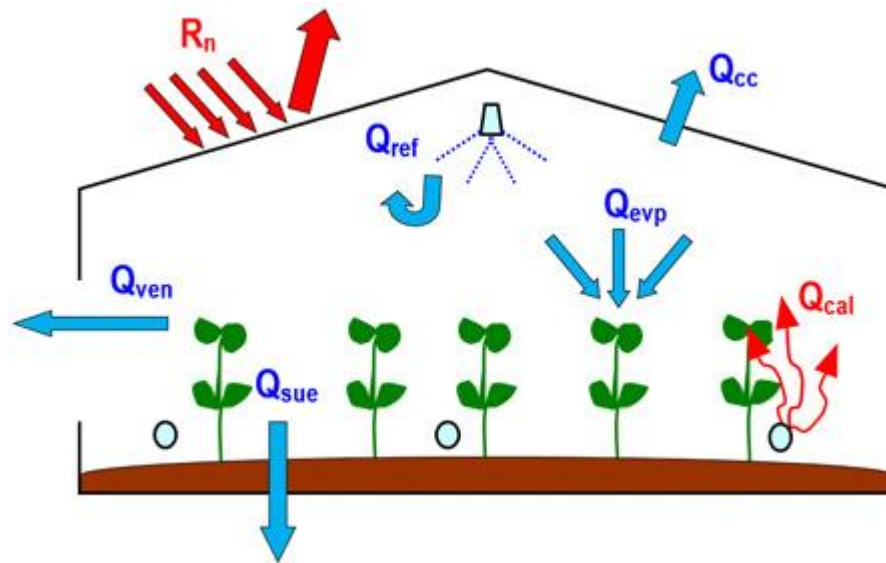


Ilustración 3-2 Pérdidas

3.1.4 Acumulador de calor en lecho de piedras.

Un lecho de material que se encapsula o de rocas usa el porte del mismo para acumular energía, ya que un aire límpido anda mediante el mismo o agitando energía. Además, coexiste diversos sólidos puede poder ser utilizados, pero comúnmente se usan mayormente las rocas (Kalogirou, 2014).

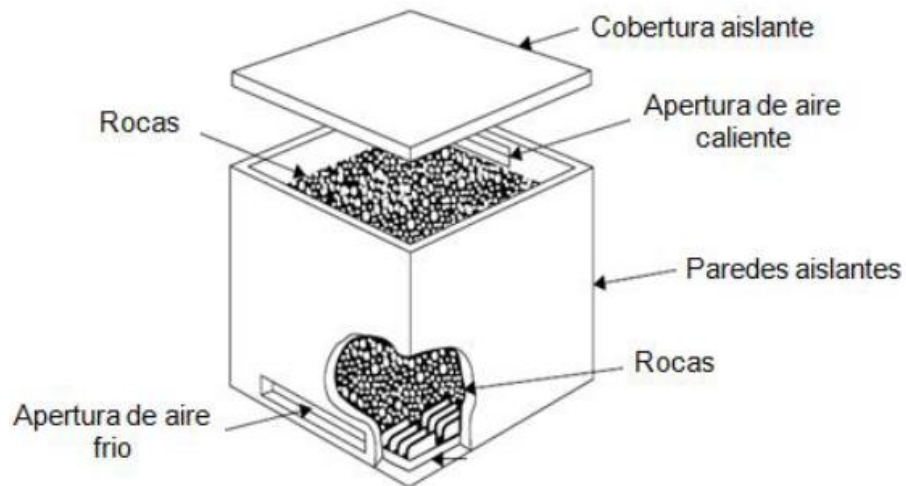


Ilustración 3-3 Almacenamiento de lecho de rocas de flujo vertical

Para Nacif (2011) el sistema del fluido caloportador penetra en una trayectoria durante la carga de acumulación y en la orientación contraria para la descarga, ya que el lecho de rocas mantiene su trabajo intercambiando calor en flujo a contracorriente para mayor eficiencia. De manera que, el acumulador se cargue y descargue en itinerarios opuestos no complica la carga y descarga de energía dentro del acumulador de forma simultánea.

La Ilustración 3-4 muestra como el acumulador se encuentra preparado de forma tal el flujo de aire para que sea vertical o lograr ser el flujo horizontal y/o igual de seguro (Behunek, 2004).

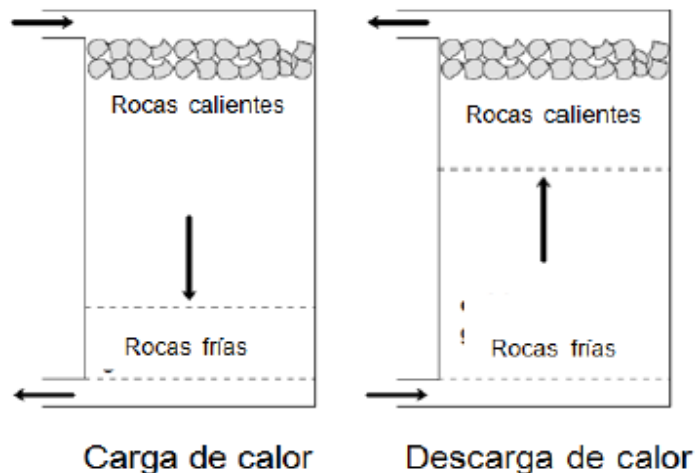


Ilustración 3-4 Esquema de carga y descarga de calor en los sistemas de almacenamiento de lecho de rocas

De igual forma, Kalogirou (2014) sostiene que las porciones que disponen una unidad del lecho compacto son:

- Un contenedor.
- Una estructura porosa para contener y apoyar el lecho.
- Distribuidores de aire para el flujo en ambas direcciones que reduzcan al mínimo el paso del aire (ver Ilustración 3-3).

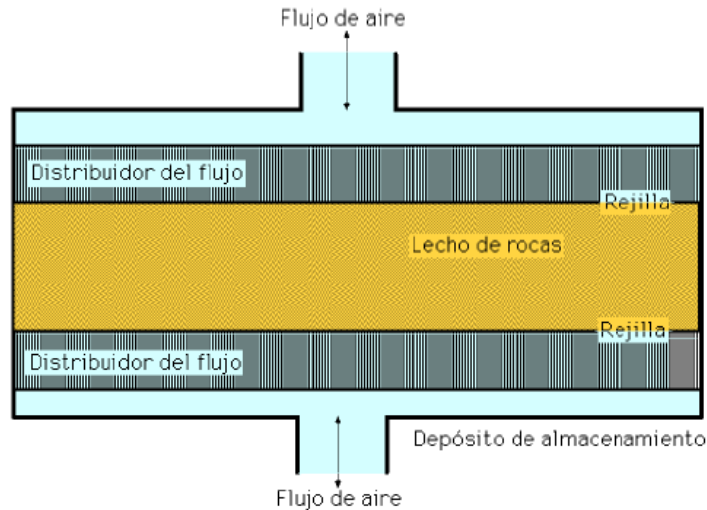


Ilustración 3-5 Unidad de almacenamiento de lecho compacto

El contenedor para las rocas se logra construir de:

- Concreto.
- Albañilería.
- Madera.
- Una combinación de las anteriores.

Por otro lado, Duffie y Beckman (2013) afirman que el tamaño de las rocas oscila entre los 35-100 [mm] de diámetro, según el flujo de aire, geometría y pérdida de carga que se desea. El volumen total de rocas estriba de fracción de la energía concedida por el colector que se pretende almacenar., ya que para atenciones residenciales se ubica entre 0,15-0,30 [m³] por metro cuadrado de colector. Para sistemas de gran tamaño, el lecho de rocas logra ser mayor que la masa y el volumen puede pasan a ser una falencia a la hora de precisar la ubicación del acumulador.

Estos métodos de depósito tienen como requerimiento una aislación ajustada, bajas fugas de aire y bajas pérdidas de carga, dado que diferentes diseños cumplen con estas exigencias. Además, estos acumuladores están diseñados de forma correcta y tienen diversas características para las diferentes aplicaciones de energía solar:

- El precio de los materiales de provisión y contenedor son de bajo costo.
- La conductividad del lecho de roca es escasa, disminuyendo los detrimentos térmicos en el método de almacenamiento y proporciona la estratificación, ya que las rocas son el punto de contacto entre las mismas, el sitio de contacto es escaso y el calor transferido es mínimo.
- La merma de carga mediante el lecho es escaso.
- La mayor ventaja de estos sistemas radica en su alto grado de estratificación.
- El método colector es de aire implicando que el colector posea una mínima que uno de agua, lo cual tiene como ventaja que es más económico y no presenta peligros de congelamiento y poca corrosión.
- Intercambia calor entre el fluido caloportador y el material de almacenamiento.

Estas características de los sistemas de acumulación en lecho de rocas se utilizan con mayor frecuencia según la calefacción de aire.

El elevado grado de estratificación que muestran estos métodos se debe a que el factor de transmisión de calor entre el aire y sólido es elevado, permitiendo que el aire conceda de forma rápida su calor hacia las rocas de manera cercana a la entrada. De igual forma, este traspaso se relaciona directamente con la granulometría del material usado, ya que esta variable debe ser discurrida para examinar estos sistemas. Se tiene, además, que la estratificación tiende a reducirse con el período de tiempo, semejante sucede en los acumuladores de tanque de agua, siendo escaso en los acumuladores de tanque de agua.

Para ilustrar la estratificación, Duffie y Beckman (2013) reflexionan que un lecho de rocas primeramente esta temperatura es firme, ingresando el aire a temperatura constante., ya que la temperatura del interior del sistema de almacenamiento lo muestra la Ilustración 3-6.

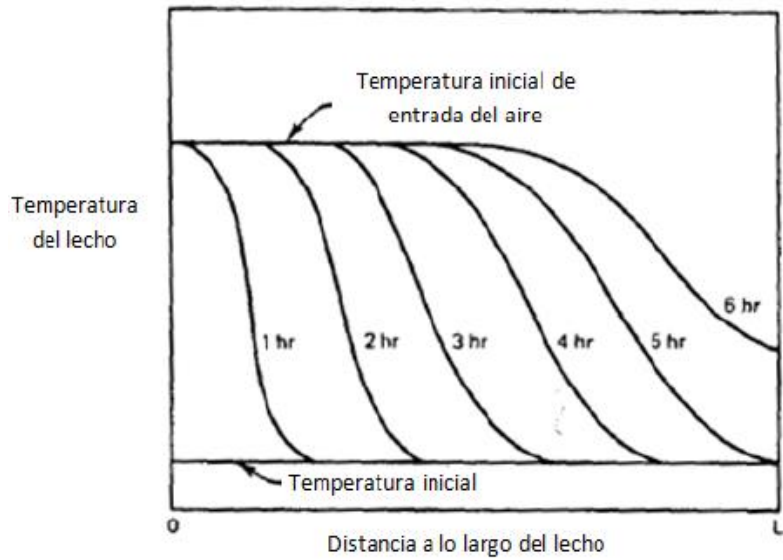


Ilustración 3-6 Distribución de temperatura en un almacenamiento de lecho de rocas durante la carga con aire a temperatura constante

Es importante destacar, que debido a la elevada capacidad de transmisión de calor y espacio entre el aire y las rocas sobrelleva el mismo a elevada temperatura y su entrega rápida el calor a las rocas, ya que estas están muy cercanas a la entrada. Cuando el lecho está repleto y su temperatura es firme. De manera que, que es importante reflexionar la variable de la radiación solar, que tiene como resultado que la temperatura de entrada a la unidad de almacenamiento sea inconstante con el tiempo, llevando esto a temperaturas de salida variables en el período de tiempo, tal como lo muestra la Ilustración 3-7 muestra que la temperatura de salida de la unidad tiene la temperatura de salida escasa, repercutiendo en y que éste trabaje con temperatura de entrada mínimas, con una eficiencia mayor. Asimismo, la temperatura de salida del aire del acumulador tiene una es pequeña, facilitando la operación y diseño del sistema colector.

$$(\rho C_p)_{Fluido} * \varepsilon * \frac{\delta T_{Fluido}}{\delta t} = \frac{(\dot{m} C_p)_{Fluido}}{A} * \frac{\delta T_{Fluido}}{\delta x} + h_v * (T_{Lecho} - T_{Fluido})$$

Ecuación 7

$$(\rho C_p)_{Lecho} * (1 - \varepsilon) * \frac{\delta T_{Lecho}}{\delta t} = h_v * (T_{Fluido} - T_{Lecho})$$

Ecuación 8

Donde:

ε : Fracción de vacío del lecho de rocas, es decir $\frac{\text{Volumen vacío}}{\text{Volumen total del lecho}}$.

h_v : Coeficiente de transferencia de calor volumétrico en $\left[\frac{W}{m^3 \cdot C} \right]$.

t: Tiempo en [s].

x: Posición a lo largo del lecho en la dirección del flujo de aire medido en [m].

Para sistemas de aire el primer término de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede despreciar y las ecuaciones se pueden reescribir en términos NTU (Number of transfer Units) de la siguiente forma:

$$\frac{\delta T_{Fluido}}{\delta \left(\frac{x}{L} \right)} = NTU * (T_{Lecho} - T_{Fluido})$$

Ecuación 9

$$\frac{\delta T_{Lecho}}{\delta \theta} = NTU * (T_{Lecho} - T_{Fluido})$$

Ecuación 10

$$NTU = \frac{h_v * A * L}{(\dot{m} C_p)_{Fluido}}$$

Ecuación 11

Donde el tiempo adimensional viene dado por:

$$\theta = \frac{t * (\dot{m}C_p)_{Fluido}}{(\rho C_p)_{Lecho} * (1 - \varepsilon) * A * L}$$

Ecuación 12

Donde:

A: Área transversal en [m²].

L: Largo del lecho en [m].

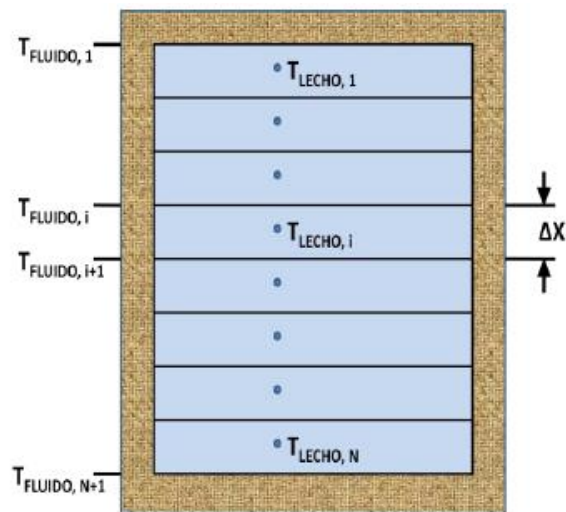


Ilustración 3-8 Acumulador de lecho de rocas dividido en N segmentos

La Ilustración 3-8 muestra que para un largo de lecho de Δx , la temperatura del lecho se puede considerar uniforme. Además, la temperatura del aire tiene un perfil exponencial y el aire saliendo del elemento i se calcula mediante:

$$\frac{T_{Fluido,i+1} - T_{Lecho,i}}{T_{Fluido,i} - T_{Lecho,i}} = e^{-NTU\left(\frac{\Delta x}{L}\right)}$$

Ecuación 13

Esta ecuación es análoga a la de un intercambiador de calor operando como evaporador. La energía transferida del aire al lecho en un lago Δx queda expresada por:

$$\begin{aligned}
& (\dot{m}C_p)_{Fluido} * (T_{Fluido,i} - T_{Fluido,i+1}) \\
& = (\dot{m}C_p)_{Fluido} * (T_{Fluido,i} - T_{Lecho,i}) * \left(1 - e^{-\frac{NTU}{N}}\right)
\end{aligned}$$

Ecuación 14

Donde $N = \frac{L}{\Delta x}$.

Luego la Ecuación 15, se tiene un balance de energía en la región Δx expresado como:

$$\frac{dT_{Lecho,i}}{d\theta} = \eta * N * (T_{Fluido,i} - T_{Lecho,i})$$

Ecuación 15

Donde η es una constante y está dada por:

$$\eta = \left(1 - e^{-\frac{NTU}{N}}\right)$$

Ecuación 16

La Ecuación 13 muestra que la N representa ecuaciones diferenciales ordinarias para las N temperaturas del lecho. Las temperaturas del fluido se calculan de la Ecuación 13. Una extensión de la Ecuación 14 considera también la pérdida de energía al ambiente, a temperatura T'_A , esto se expresa como:

$$\frac{dT_{Lecho,i}}{d\theta} = \eta * N * (T_{Fluido,i} - T_{Lecho,i}) + \frac{(U\Delta A)_i}{(\dot{m}C_p)_{Fluido}} * (T'_A - T_{Lecho,i})$$

Ecuación 17

Donde $(U\Delta A)_i$ es el producto entre el área de pérdida y el coeficiente de pérdida para el nodo i.

Para la determinación del coeficiente de transferencia de calor en lechos de rocas se puede utilizar:

$$h_v = 650 * \frac{G^{0,7}}{D}$$

Ecuación 18

Donde:

G: es el gasto másico superficial en $\left[\frac{kg}{m^2s}\right]$.

D: es el diámetro equivalente de la roca en metros. Está dado por:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} * \frac{\text{Volumen neto de las rocas}}{\text{Número de rocas}}}$$

Ecuación 19

Un lecho trazado debe tener un tamaño de rocas pequeño para reducir al mínimo los gradientes de temperatura que presentan, asegurando que el coeficiente de intercambio de calor sea lo suficientemente grande. Aplicando Biot al caso de las esferas de radio R y conductividad térmica k:

$$Bi = \frac{h * R}{k}$$

Ecuación 20

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor en $\left[\frac{W}{m^2°C}\right]$, es decir:

$$h = \frac{h_v}{\text{área de superficie por volumen de rocas}}$$

Ecuación 21

Si cumple:

$$Bi < 0,1$$

Ecuación 22

La resistencia térmica de las partículas y gradientes de temperatura se consideran despreciables, a diferencia si se tiene que el número de Biot es superior a 0,1, queriendo

reflexionar los gradientes de temperatura dentro de las partículas, se logra precisar un valor rectificado para NTU, según:

$$NTU_c = \frac{NTU}{1 + \frac{Bi}{5}}$$

Ecuación 23

Adonde NTU_c pertenece al valor NTU corregido, que puede ser usado en cualquiera de las fórmulas de este conjunto donde se utiliza NTU.

3.1.5 Sensores e instrumentación.

Para la comprobación de las temperaturas del acumulador de piedra, entrada, salida del aire y del ambiente exterior, se usaron termopares de cobre, constatan enlazados a un método automático de ventaja de datos “Delta Logger” proyectado. Se colocaron 25 termopares en el interior del lecho de piedra ubicado en el módulo Norte y distribuidos en cinco planos perpendiculares al eje (A, B, C, D y E). Los planos E y A están situados a 0,25 m de los extremos Este y Oeste, respectivamente (ver Ilustración 3-9). Se involucraron 5 termopares para el cálculo de los contextos del aire a la entrada, salida y ambiente.

Por otro lado, la irradiación solar fue medida con un radiómetro Black & White y las temperaturas para el control con semiconductores LM35, ya que los sensores fueron ajustados a una computadora PC/AT provisionada por una tarjeta de adquisición de datos Keithley 1600 y a un circuito para el comando de contactores para el control del ventilador trifásico garante de la circulación del aire en el lecho de piedra y en el invernadero.

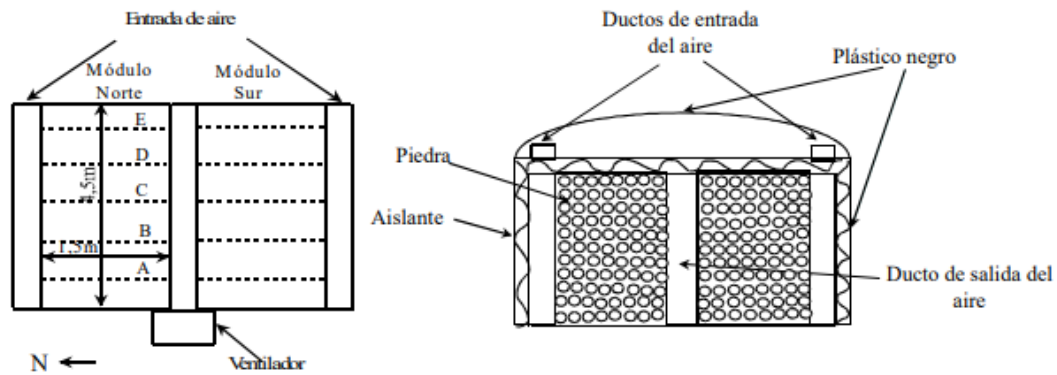


Ilustración 3-9 Esquema del acumulador en planta y corte

3.1.5.1 Invernadero

Para precisar la actuación del invernadero es importante tomar en consideración la siguiente medición:

- Temperatura: Se usan en los canteros, macetas, entre otros; ya que son semiconductores LM35 en aire y agua; termistores de 10 [KΩ] en la estructura (en caso de ser metálica), cubiertas de plásticos y suelo.
- Humedad: Se usan puntas capacitivas ± 2 [%].
- Radiación: Se utilizan piranómetros. (no sé si incluir las marcas Kipp & Zonnen, Black & White y LI-COR 200SA).

Se realiza un monitoreo general con el sistema analógico/digital NUDAM con tarjetas de adquisición de datos Keitley 1600 y PCLab 812 de 16 canales analógicos de entrada y 8 canales digitales de salida en cada una de las computadoras PC/AT., ay que se debe diseñar cierto software que admita dirigir el circuito lógico con relay, controlando los contactores de las bombas y del ventilador.

Por otro lado, el método de control se fundaría en el cotejo de diferentes medidas, como la temperatura que se fije de referencia, temperatura del ambiente interior del invernadero y la hora del día. La temperatura de referencia (T_{ref}) es la temperatura de una placa de hierro (0,04 m de alto, 0,04 m ancho y 0,005 m espesor) pintada de negro y aislada del ambiente del invernadero en el frente mediante un vidrio y por la parte de atrás con una placa de poliestireno expandido de 0,05 m de espesor. Se encuentra situada en la parte superior del invernadero entre las dos cubiertas, ya que esta temperatura se usa para que la computadora

establezca si el método de colectores tiene la posibilidad de impregnar energía solar o no, es decir, el programa de control tiene subrutinas que examinan las variaciones del día completo.

3.1.5.2 Lecho en piedra

El lecho de piedra está integrado por un contenedor en forma de jaula con malla romboidal en sus lados, de 4,5 m por 1,5 m de ancho por 1 m de altura con el eje principal en la dirección Este-Oeste, ya que esta malla está soportada por 16 caños estructurales de 1,50 m de largo. Dentro de la jaula se colocaron las piedras y en la parte superior se colocó un plástico y una capa de 0,05 m de arena para evitar la salida de aire por esta zona (Burciaga-Satos, 2011).

Asimismo, los conductos de entrada se construyeron con malla tipo sima cuadrada de 0,15 m por 0,15 m, dado que todo el sistema fue envuelto con una capa de poliestireno expandido de alta densidad (16 kg m^{-3}) de 0,10 m de espesor formando una caja de $18,5 \text{ m}^2$ de superficie exterior, ya que esta caja presenta dos entradas en la parte superior Este y una salida en el medio del lateral que da hacia el Oeste. De esta manera, el aire que procede del invernadero entra a cada módulo por la parte superior en el sector Este, atravesando el lecho de piedra, regresando mediante el ducto formado por los dos módulos y por la abertura efectuada en la parte Oeste de la caja.

CAPÍTULO 4. MONITOREO Y CONTROL DEL SISTEMA

En los invernaderos es importante tener un sistema de control de variables con el propósito de aumentar la calidad y el rendimiento de las plantas, dado a que en las estaciones de poca iluminación la producción de hortalizas y/o vegetales se hace en menor grado.

Las variables que son primordiales en un invernadero, corresponden a las siguientes:

- Temperatura
- Humedad
- CO₂
- Niveles de iluminación

Dado a que el monitoreo se realiza en un ambiente cerrado y habitualmente en una gran extensión, es complejo y costoso realizar instalaciones de cableado y modificaciones de la infraestructura. Por ello, es recomendable el uso de sistemas inalámbricos para el monitoreo de las variables mencionadas. Control de temperatura con sistema de activación de extracción de aire del acumulador cuando la temperatura interna del invernadero esté llegando a 3 [°C] sobre la temperatura límite de la planta en juego, (podría ser un termostato conectado a una computadora que avise con un sí o un no a un sistema de ventilación conectado al acumulador):

Control de CO₂

Control de Humedad.

CAPÍTULO 5. Análisis económico.

5.1 Costos de construcción e instalación.

Este acápite tiene como propósito establecer la organización apreciable del análisis financiero, tomando en consideración los costos variables del panel solar e invernadero que a continuación se describen. Para el análisis de costo se toma en consideración todos los costos implicados, en donde se encuentran, los costos de inversión, los de producción y gastos generales.

A continuación, se detallan los costos, para el establecimiento del panel solar e invernadero, contenido de su funcionamiento, los que consisten en:

5.1.1 5.1.1. Costos de inversión

El panel solar contiene el sistema solar contenido de colector tubos heat pipe, el sistema auxiliar que contiene el calefón Solar 13 Lts, las cañerías y fittings dispuesta de válvula de Seguridad $\frac{3}{4}$, válvula antirretorno $\frac{3}{4}$ Giacomini, aislación en [m] de 19 mm, cañería de cobre en [m] $\frac{3}{4}$, válvula de bola $\frac{3}{4}$ giacomini, llave de bola $\frac{1}{2}$ giacomini, fittings (por termo), vaso expansión, mezclador termoestático kd 2205 cobra y kit Hidráulico, además de la mano de obra, por un monto de \$ 15.613.758 (Ver Anexo 1 y 2)

Por su parte el invernadero, dispone de una estructura con cerchas de pino, soleras, radiador, ventanas, pies derechos, cadenas, costaneras, canaletas de invernadero, polietileno 0,15, polietileno 0,1 (capa interna), malla raschel (80%), clavos, alambre (ver Anexo 3), incluyendo la mano de obra, por un monto de \$ 9.346.721, entre otros gastos de sueldos, equipamiento, gasto de operaciones, otros y muebles y enseres, para un total de \$24.960.470 como inversión. Además, de los gastos generales, depósitos y fianzas y provisión de fondos (efectivos, para un total general de inversión de \$ 71.929.519.20, tal como lo describe la Tabla 5-1 (Ver Anexo 4).

Descripción	Costo total \$
Panel Solar	
Sistema Solar	
Sistema Auxiliar	\$ 9.788.372
Cañerías y Fitting	\$ 666.160
Invernadero	\$ 13.846.721
Contenedores y almacigueras	\$ 12.982.458
Sistema de riego	\$ 2.526.177
Sistema de drenaje	\$ 3.942.435
Sistema de electricidad	\$ 2.721.365
Sistema de calefacción	\$ 2.675.724
Bodega y baño	\$ 2.617.460
Instrumentos de trabajo	\$ 1.590.000
Fosa	\$ 983.040
Gastos administrativos de inversión	\$ 1.991.970
Mano de obra total	\$ 3.450.000
Total costos de inversión	\$ 59.782.146

Tabla 5-1 Resumen total inversión

5.1.2 Costos de producción.

Estos precios son importantes para que el procedimiento marche eficiente durante el año, permitiendo estimar los sucesos que se constituyan logrando precisar el proceso productivo.

Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Total
Agua potable	m ³		550	\$ 390.060
Energía eléctrica	kw/h	\$ 279	1.000	\$ 279.000
Semillas	g	\$ 111	333	\$ 36.963
Solución nutritiva	L	\$ 411	10.652	\$ 4.377.972
Esponja de poliuretano	m ²	\$ 2001	95	\$ 190.095
Sustrato	m ³	\$ 64.815	9	\$ 583.335
Combustible	L	\$ 1.350	4.000	\$ 5.400.000
Cajas	caja	\$ 90	7.908	\$ 711.720
Bolsas	bolsa	\$ 24	94.900	\$ 2.277.600
Total				\$ 14.246.745

Tabla 5-2 Costos de producción

5.1.3 Gastos generales

A continuación, se describen los gastos que poseen una relación indirecta, dado que no tiene dependencia con el proceso productivo, también es una participación al capital efectivo directo de la inversión.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor anual
Mano de obra	JH/día	3	\$ 1.530.000	\$ 18.360.000
Contador	Anual	1	\$ 750.000	\$ 9.000.000
Mantención camioneta	Estimada anual	1	\$ 900.000	\$ 10.800.000
Teléfono celular	Mensual	1	\$ 126.000	\$ 1.512.000
Depreciaciones	Anual	1	\$ 1.031.351	\$ 1.031.351
Contribuciones	Exento			\$ 0
Total				\$ 40.703.351

Tabla 5-3 Gastos generales

5.1.4 Ventas

VENTAS DE PRODUCTO (en pesos chilenos)			
	Panel solar	Invernadero	Total
Mes 1	15,613,758	9,346,721.00	24,960,479.00
Mes 2	16,082,170.74	9,346,721.00	25,428,891.74
Mes 3	16,564,635.86	0.00	16,564,635.86
Mes 4	17,061,574.94	9,346,721.00	26,408,295.94
Mes 5	17,573,422.19	9,346,721.00	26,920,143.19
Mes 6	18,100,624.85	0.00	18,100,624.85
Mes 7	18,643,643.60	9,346,721.00	27,990,364.60
Mes 8	19,202,952.91	9,346,721.00	28,549,673.91
Mes 9	19,779,041.49	9,346,721.00	29,125,762.49
Mes 10	20,372,412.74	9,346,721.00	29,719,133.74
Mes 11	20,983,585.12	9,346,721.00	30,330,306.12
Mes 12	21,613,092.67	9,346,721.00	30,959,813.67
Año 1	221,590,915.10	93,467,210.00	315,058,125.10
Año 2	243,750,006.61	102,813,931.00	346,563,937.61
Año 3	329,062,508.93	138,798,806.85	467,861,315.78
Año 4	444,234,387.05	187,378,389.25	631,612,776.30
Año 5	599,716,422.52	252,960,825.48	852,677,248.00

Tabla 5-4 Ventas

Los precios del producto propiamente varían de acuerdo la zona. Para el caso de la Zona Sur, el Panel Solar tiene un coste de \$15.613.758,00 y el Invernadero posee un monto \$9.346.721,00. Se estime que el precio tenga una variación interanual de 10% para el año 2 y 3% para el año 3. Todo esto permite que las proyecciones de ingresos sean de \$315.058.125,10 para el primer año, aumentando en 9,09% para un total de \$346.563.937,61 para el año 2 y finalmente un aumento del 66,35% con respecto al año uno, siendo este un total de \$467.861.315,78. Por otra parte, para el año 4 y 5 los aumentos serán de \$631.612.776,30 y \$852.677.248,00, respectivamente, lo cual muestra que el desarrollo del proyecto al pasar los años sigue siendo viable en cuanto a rentabilidad en función de los costos.

5.1.5 Costes Variables

COSTE VARIABLE DEL PRODUCTO			
	Panel solar	Invernadero	Total
Mes 1	1,854,914.45	1,764,660.92	3,619,575.38
Mes 2	1,910,561.88	1,764,660.92	3,675,222.81
Mes 3	1,967,878.74	0.00	1,967,878.74
Mes 4	2,026,915.10	1,764,660.92	3,791,576.03
Mes 5	2,087,722.56	1,764,660.92	3,852,383.48
Mes 6	2,150,354.23	0.00	2,150,354.23
Mes 7	2,214,864.86	1,764,660.92	3,979,525.78
Mes 8	2,281,310.81	1,764,660.92	4,045,971.73
Mes 9	2,349,750.13	1,764,660.92	4,114,411.05
Mes 10	2,420,242.63	1,764,660.92	4,184,903.56
Mes 11	2,492,849.91	1,764,660.92	4,257,510.84
Mes 12	2,567,635.41	1,764,660.92	4,332,296.33
Año 1	26,325,000.71	17,646,609.25	43,971,609.96
Año 2	28,957,500.79	19,411,270.17	48,368,770.96
Año 3	39,092,626.06	26,205,214.73	65,297,840.79
Año 4	52,775,045.18	35,377,039.89	88,152,085.07
Año 5	71,246,311.00	47,759,003.85	119,005,314.85

Tabla 5-5 Costos variables

Los costes variables del producto son de 11,88% para el caso del Panel Solar y para el Invernadero es de 18,88%. Con respecto al precio de este en función al porcentaje de ventas, corresponde en promedio para el año uno, dos y tres de 16,12%.

En el siguiente acápite, se describe los ingresos y egresos asociados a la evaluación Técnica Económica de Estrategia para Calefacción de Invernaderos Zona Sur, Mediante Energía Solar Activa o Almacenada, A continuación, las Tabla 5-6 y 5-7 detallan los Ingresos y Egresos de los siguientes 5 años.

		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión	\$ 73,921,484					
Ingresos		\$315,058,125.00	\$346,563,938.00	\$467,861,316.00	\$631,612,776.00	\$852,677,248.00
Egresos		\$49,058,270.00	\$51,504,884.00	\$54,080,128.00	\$56,784,134.00	\$59,623,341.00

Tabla 5-6 Ingresos y egresos

La Tabla 5-6, los Ingresos han tenido un ascenso considerable durante a partir del período 2. En cuanto a los Egresos, se logra evidenciar un aumento desde el año 2, los resultados brindan aspectos importantes para que el flujo de caja influya de manera significativa en la toma de decisiones de la empresa, dado que en cada periodo se efectúan cobranzas y/o ingreso de efectivo a caja, para lograr solucionar los gastos dentro de la misma y una vez realizada las actividades comerciales se logrará establecer el saldo como utilizable siendo este una cifra positiva en los Ingresos y así llevar a cabo la evaluación Técnica Económica de Estrategia para Calefacción de Invernaderos Zona Sur, ya que en estos se verán reflejado en el costo-beneficio de la estrategia de calefacción, tal como se logra observar en la Ilustración 5-1.

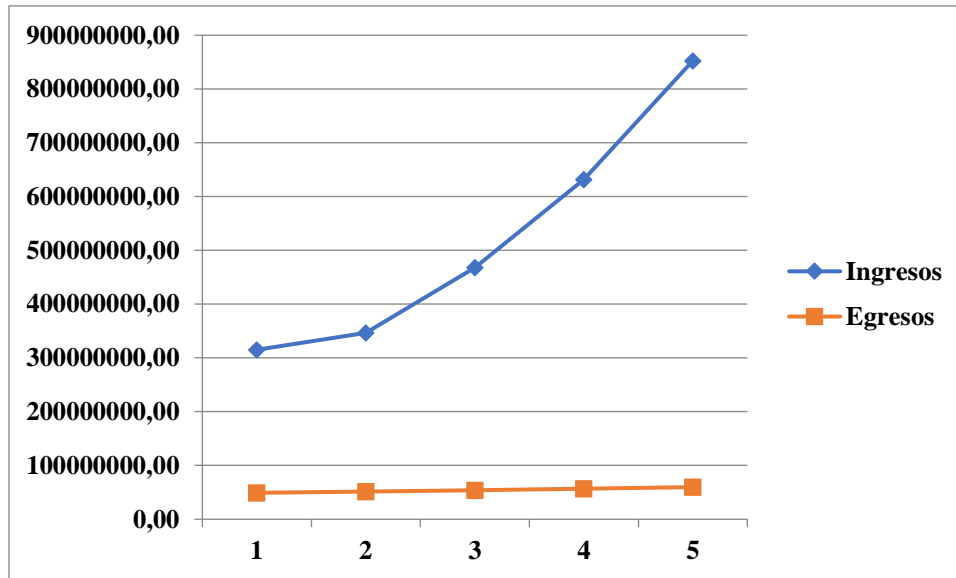


Ilustración 5-1 Ingresos y egresos

Adicionalmente, la Tabla 5-7 muestra el valor actual neto (VAN) y la relación costo-beneficio de la estrategia, teniendo como resultados que VAN Ingresos con \$739.742.475 supera el VAN Egresos con \$90.688.567, lo que demuestra que la Relación Costo-Beneficio es de 4, es decir, es **ACEPTABLE** desarrollar y llevar a cabo la estrategia para Calefacción de Invernaderos Zona Sur, Mediante Energía Solar Activa o Almacenada.

VNA INGRESOS	\$ 739,742,475
VNA EGRESOS	\$ 90,688,567
VNA EGRESOS+INGRESOS	\$ 164,610,051
COSTO-BENEFICIO	\$ 4

Tabla 5-7 Relación costo-beneficio

5.1.6 Costo de consumo energético de los sistemas fotovoltaicos

En el marco del proyecto energías renovables para autoconsumo en Chile, cuyo propósito es elaborar un indicador de precios por rangos de potencia instalada de sistemas fotovoltaicos actualmente comercializados en el mercado chileno, y cuyo estudio va dirigido a proveedores del mercado solar FV y a potenciales clientes y personas interesadas de la ciudadanía, con la intención de darle transparencia al mercado y establecer una base de entendimiento sobre los precios de esta tecnología (NAMA Chile, 2020).

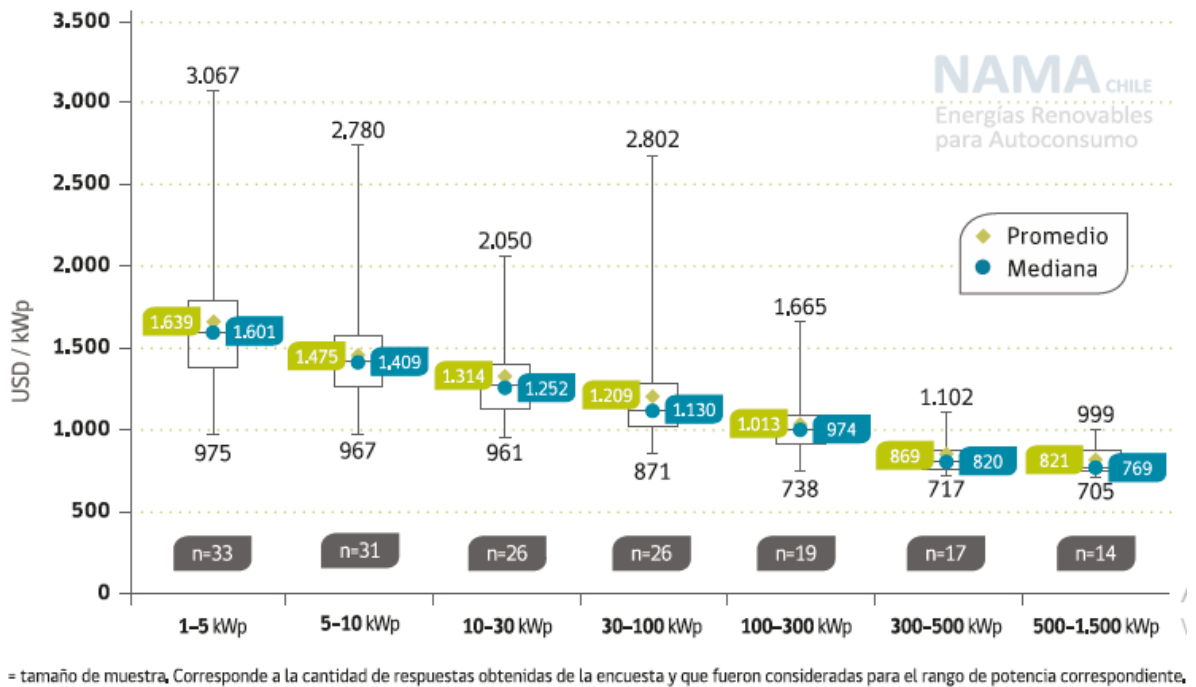


Ilustración 5-2 Análisis estadístico de precios de sistemas fotovoltaicos comercializados en Chile 2020, sin IVA

De 58 empresas consideradas como objeto de estudio, 44 respondieron a la encuesta los resultados muestran que las empresas informaron en CLP sin IVA, estos fueron transformados a USD., tomando en consideración la tasa de cambio del dólar observados en Chile entre agosto 2019 y julio 2020 de \$780,56 (CLP/USD).

Rango de potencia [KWp]	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo
1 a 5	1.279.367	1.250.000	761.000	2.394.000
5 a 10	1.151.102	1.100.000	755.000	2.170.000
10 a 30	1.025.700	977.611	750.00	1.600.000
30 a 100	943.347	882.000	680.000	2.187.178
100 a 300	790.319	760.000	575.860	1.300.000
300 a 500	678.612	640.000	560.000	860.000
500 a 1.500	640.645	600.000	550.000	780.000

Tabla 5-8 Costo destacado de proyectos llave en mano por rango de potencia 2020 en CLP, sin IVA

Al igual que los índices de precios FV de años anteriores, se muestra que los valores promedio y la mediana de precios por rango de potencia disminuyen a medida que aumenta el tamaño del sistema FV. Además, disminuye la diferencia entre los valores correspondientes al mínimo y máximo de cada rango de potencia a medida que aumenta el tamaño de la instalación, a excepción del rango 30-100 (KWp), donde se tiene un valor extraño como máximo. La Tabla 5-9 muestra los precios de las instalaciones FV llave en mano en Alemania, utilizados para realizar la comparación con los valores de IdP de Chile, que corresponden a datos levantados durante el segundo trimestre de 2020.

Rango de potencia [KWp]	IdP FV 2020 Chile [USD/KWp]	IdP FV 2020 Alemania [USD/KWp]	Diferencia
1 a 5	1.639	1.682	-2,6%
5 a 10	1.475	1.425	3,4%
10 a 30	1.314	1.1.89	9,5%
30 a 100	1.209	1.000	17,2%
100 a 300	1.013	931	8,0%
300 a 500	869	824	5,2%
500 a 1.500	821	733	10,7%

Tabla 5-9 Valores promedios sin IVA y en (USD/kWp), del índice (IdP) de Chile y Alemania con su respectivo rango de potencia y porcentaje de variación del precio promedio por rango en 2020.

De igual forma, el análisis muestra que las diferencias respecto al 2019 se han constreñido para todos los rangos de potencia en instalaciones menores a 100 (kWp), mientras que para instalaciones de mayor escala (mayores a 100(kWp) la diferencia se ha

mantenido similar a la descrita en el 2018. Para el año 2019 las diferencias bordeaban el 15-20% para los rangos de potencia más bajos y ahora se encuentran por debajo del 10%, lo cual propone que el mercado FV chileno está alcanzando un nivel de madurez similar al de mercados más maduros, como el de Alemania.

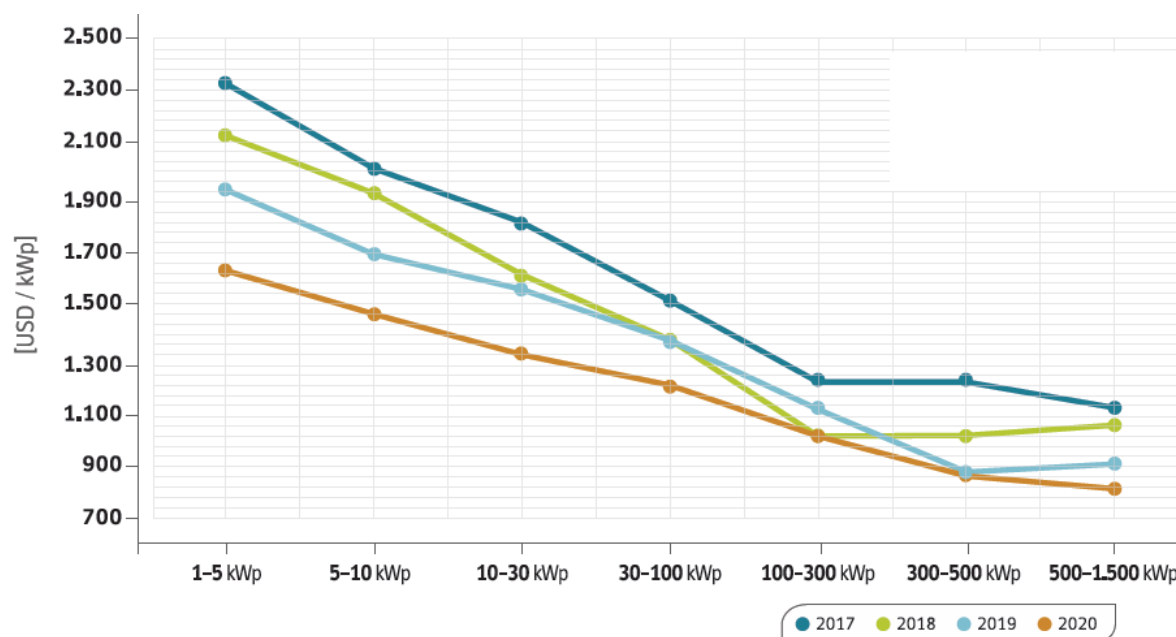


Ilustración 5-3 Comparación de IdP FV promedio en Chile para los años 2017, 2018, 2019 y 2020, sin IVA

Se puede observar que para los diferentes ejercicios del Índice de Precios, existe una baja sólida año tras año para los rangos de potencia hasta 100 (kWp). Además, para los rangos de potencia mayores a 100 (kWp) también se observa una baja de precios de los sistemas fotovoltaicos, con la excepción de la serie de comparación del año 2018 a 2019, debiéndose principalmente a que el ejercicio del año 2019 se diferenciaron los rangos de 100 a 300 (kWp) y 300 a 500 (kWp), tal como se muestra en la Tabla 5-10 y 5-11, respectivamente.

Año	1-5 kWp	5-10 kWp	10-30 kWp	30-100 kWp	100-300 kWp	300-500 kWp	500-1.500 kWp
2017	2.326	2.009	1.795	1.510	1.213	1.213	1.122
2018	2.141	1.913	1.602	1.371	1.007	1.007	1.046
2019	1.923	1.693	1.560	1.367	1.113	869	900
2020	1.639	1.475	1.314	1.209	1.013	869	821

Tabla 5-10 Valores promedio del IdP FV en Chile en (USD/kWp) para los años 2017, 2018, 2019 y 2020, sin IVA

Año	1-5 kWp	5-10 kWp	10-30 kWp	30-100 kWp	100-300 kWp	300-500 kWp	500-1.500 kWp
2018	-8%	-5%	-11%	-9%	-17%	-17%	-7%
2019	-10%	-12%	-3%	0%	10%	-14%	-14%
2020	-15%	-13%	-16%	-12%	-9%	0%	-9%

Tabla 5-11 Porcentajes de variación interanual del promedio por rango para el IdP de Chile

5.2 Financiamiento estatal.

El sector energía requiere de variadas alternativas de costo eficiente para descarbonizarse, demanda acumular electricidad renovable a costos competitivos; suministrar opciones de combustibles bajo o cero carbono para el sector transporte; electrificar en lugares remotos sin acceso a las redes de distribución; reutilizar la mayor cantidad de infraestructura eficiente existente para ser competitivo, entre otros. Esta tecnología sigue creciendo a paso firme en el Sistema Eléctrico Nacional, conduciendo el listado de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) (Revista Electricidad, 2021).

La tecnología solar fotovoltaica permite ver el desarrollo de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en Chile, totalizando 2.720 MW de capacidad instalada en proyectos en operaciones dentro del Sistema Eléctrico Nacional, sumándose otros 226 MW de iniciativas que están en periodo de pruebas y otros 2.823 MW en cimentación, por lo que a fines de 2021 los datos del Reporte ERNC de la Comisión Nacional de Energía (CNE) evalúan que estarán operando 5.769 MW. Además, se discurre que los proyectos solares fotovoltaicos (FV) que tienen Resolución de Calificación Ambiental (RCA) aprobada: 18.516 MW, mientras que en calificación ambiental se encuentran otros 9.532 MW, de acuerdo con la CNE.

Según la Coordinador Eléctrico Nacional, actualmente existen 202 centrales generadoras con esta tecnología, superando en número a las plantas termoeléctricas (185); hidráulicas (163), y eólicas (36), ya que el desarrollo de proyectos solares es el que tiene mayor potencial, apuntando que el avance de estas tecnologías muestra números de crecimiento en generación distribuida, Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD)

y en proyectos de generación superiores a 9 MW, en generación distribuida, a marzo de este año existían 6.009 instalaciones con una capacidad total instalada de 49,3 MW, de los cuales el 99,8% corresponde a instalaciones solares fotovoltaicas (FV), mientras que, en el caso de los PMG, PMGD y proyectos de mayor escala, actualmente el 11% de la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional corresponde a plantas solares FV (2,6 GW), y el 43% de los proyectos actualmente en construcción son solares FV (2,5 GW), con lo cual se duplicará la capacidad instalada solar FV en 2021 (Revista Electricidad, 2021).

De igual forma, se afirma que este incremento reconoce la reducción en los costos de inversión, las economías de escala en la implementación de proyectos de mayor tamaño, la creación de bloques horarios de demanda dentro de las licitaciones de suministro, la mayor demanda de clientes libres por con contratos de suministro con instalaciones FV, la mayor oferta de proveedores con costos competitivos, el incremento en la eficiencia de conversión energética de esta tecnología y la rápida implementación de proyectos a gran escala. Asimismo, se resalta el éxito logrado por esta tecnología en Chile se debe a los esfuerzos realizados a nivel gubernamental en términos de la Política Energética 2050 y el Plan de Descarbonización, así como los esfuerzos en cuanto a investigación científica que han permitido la reducción de los costos de los paneles, alcanzando un desarrollo tecnológico maduro.

De manera que, las tecnologías solares son de las primordiales elecciones para apoyar a Chile en este proceso de descarbonización, ya que son confiables y competitivas, y en las últimas licitaciones han mostrado precios igualados de energía de US\$ 24 por MWh para sistemas fotovoltaicos y de US\$64 MWh para sistemas de CSP.

De igual forma, el gobierno nacional tiene la iniciativa, en el marco del Programa Transferencia de ERNC para el Sector Silvoagropecuario de la Seremi de Agricultura y diseñada por el Programa de Medidas y Proyectos de ERNC y Eficiencia Energética de la Seremi de Energía, fomentar el financiamiento, permitiendo forjar ahorros del 37% en las cuentas de electricidad de este tipo de proyectos, aumentando los niveles de sustentabilidad en la operación de dicha planta, logrando reducir 9 toneladas de CO₂ anuales. Por tanto, la operatividad del sistema fotovoltaico aplicado a invernaderos en Chile demuestra que se ha logrado tiene el sello de la política energética del Estado comprendido en la Ruta Energética

2018–2022, apuntando a incentivar el uso de las energías renovables aprovechando la normativa vigente, como lo es la Ley de Generación Distribuida y lograr inyectar los excedentes energéticos al sistema.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.

6.1 Análisis de resultados.

De acuerdo a los resultados de la presente investigación se pudo determinar la Evaluación Técnica Económica de Estrategia para Calefacción de Invernaderos Zona Sur, Mediante Energía Solar Activa o Almacenada cumple satisfactoriamente el objetivo del estudio. Esto permite deducir que la implementación de un invernadero mediante energía solar activa o almacenada como nuevas fuentes de energía renovable en la matriz de generación eléctrica fotovoltaica en Chile, demuestra la evolución de los impactos tanto técnicos como económicos, a nivel de gestionabilidad, derivados de una penetración importante de fuentes renovables solar, obteniendo como resultados proyectados a la largo plazo, constituyendo un 40% de la generación del país, situándose las energías renovables con una participación en torno al 60%.

A este respecto, las aportaciones de Angulo (2017) demuestran que el cálculo en la potencia que es idónea en la calefacción permiten demostrar que en la máxima potencia requerida fue de 352,5 W/m² (84,61 kW para la superficie total del invernadero), en cuanto a la combinación las condiciones climáticas de temperatura, viento y nubosidad, más desfavorables o extremas. También logró evaluar el invernadero bajo las condiciones más altas de temperatura determinando que la ventilación natural es suficiente para no superar la máxima biológica del cultivo.

Los análisis dan cuenta de una tendencia creciente hacia la penetración de energías renovables que los modelos señalan como fuentes costo-efectivas, principalmente solar más de 20 GW hacia el 2050. De igual forma, el suministro energético a partir de energías renovables alcance alrededor de 17,7 TWh para el 2023, lo que equivale a un 63% de las necesidades agregadas de energía eléctrica del sector en dicho año. Por otro lado, existen beneficios medioambientales en el uso de energía fotovoltaica en los invernaderos, lo cual admitirá la transformación de los cultivos en los próximos años.

Asimismo, Burciaga (2011) demuestra que los flujos de energía que se dan entre el invernadero y su entorno pueden presentar algún tipo de falencia, ya que dada la cantidad de

variables climáticas que influyen, requieren del uso de paquetes de simulación dinámica detallada, tomando en consideración su variabilidad en el tiempo, y lograr valorar los consumos energéticos que requiere el invernadero para obtener condiciones de favorables que son demandadas por el cultivo.

Por tal razón, se puede afirmar que el costo de las iniciativas de optar por una estrategia de calefacción de invernaderos dependerá de las tipologías de los distintos tipos de motores, bombas, cabezales y variantes de potencia, caudal, tipo de terreno, horas de bombeo al día y carga manométrica total y que permita optimizar la eficacia energética y uso de energías renovables no convencionales en el sector agrícola de la Zona Sur de Chile. Además, es importante que los productores con las diferentes iniciativas del Estado Chileno, le den un lugar predominante entre sus fuentes de energía y que ésta le permita dar solución en la mayor parte del territorio agrícola chileno.

6.2 Conclusiones.

Se logró evaluar opciones de calefacción de invernaderos del sector de Palquibudi (Rauco, Curicó), con cultivos de tomate, lechuga, repollos, brócoli, berenjena, apio, pimentón y pepino, tomando en consideración las tuberías agua caliente, aerotermos, generadores de aire caliente, generadores y distribución, por manga de polietileno, de aire caliente, y la temperatura del aire interior más homogénea. Por ello, climatizar los cultivos protegidos tiene un efecto importante, ya la radiación infrarroja o térmica y la temperatura son componentes clave en los cultivos; además deben tomarse medidas para que crezcan y se desarrollen de forma más segura, y regular cada fase de crecimiento.

En cuanto a la elaboración de las propuestas de proyecto factibles de ser presentados a fondos estatales para su implementación real por parte de los agricultores, se tiene que el Estado Chileno conjuntamente con sus Programas de Energías Renovables para la agricultura sustentable y Programa de Medidas y Proyectos de ERNC y Eficiencia Energética de la Seremi de Energía, fomentar el financiamiento, permitiendo forjar ahorros del 37% en las cuentas de electricidad de este tipo de proyectos, aumentando los niveles de sustentabilidad en la operación de dicha planta, logrando reducir 9 toneladas de CO₂ anuales, lo que permite

afirmar que una región con características especiales de aislamiento, logra dar respuesta a las diversas necesidades productivas y mejoramiento de la calidad vida rural en el país.

Por su parte, evaluar la incorporación de acumuladores de calor para aportar en la noche, en especial en épocas de heladas y sistemas de distribución homogénea del calor en el cultivo, permite demostrar que estos métodos de depósito tienen como requerimiento una aislación ajustada, bajas fugas de aire y bajas pérdidas de carga, dado que diferentes diseños cumplen con estas exigencias, a su vez, están diseñados de forma correcta. También, para el estudio de un método acumulador de lecho de rocas es importante tomar en cuenta que las rocas y el aire modifican su temperatura en la trayectoria del flujo de aire, existiendo desiguales en cuanto a temperaturas se refiere de las mismas.

En cuanto a incorporar instrumentación de medición de parámetros de control, se tiene que el monitoreo se efectúa en un ambiente cerrado y en una gran extensión, es complicado y oneroso realizar instalaciones de cableado y modificaciones de la infraestructura. Por ello, es recomendable el uso de sistemas inalámbricos para el monitoreo de las variables mencionadas. Control de temperatura con sistema de activación de extracción de aire del acumulador cuando la temperatura interna del invernadero esté llegando a 3 [°C] sobre la temperatura límite de la planta.

Finalmente, se logró evaluar los costos de inversión y mantención de sistema solar o acumulación, demostrando que el valor actual neto (VAN) y la relación costo-beneficio de la estrategia, se tiene como resultados que VAN Ingresos con \$739.742.475 supera el VAN Egresos con \$90.688.567, lo que demuestra que la Relación Costo-Beneficio es de 4, es decir, es ACEPTABLE desarrollar y llevar a cabo la estrategia para Calefacción de Invernaderos Zona Sur, Mediante Energía Solar Activa o Almacenada.

CAPÍTULO 7. Bibliografía

- Angulo, J. (2017). Evaluación técnica y económica de un sistema eólico de energización para invernaderos agrícolas en condiciones extremas en la XII región de Chile. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Aramendiz, H., Robles, J., Cardona, C., Llano, J., y Arzuaga, E. (2006). Caracterización morfológica de la berenjena (*Solanum melongena*. L.). *Temas Agrarios*, 11(1), 5-14.
- Arellano, J. (2020). Evaluación del desarrollo morfológico de diferentes variedades de brocoli (*brassica oleracea* var. *itálica*) bajo un sistema hidropónico NFT. Disponible en:
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ARELLANO%20KUHN%20JOSUE%20OCTAVIO%20.pdf>
- Attara, I. (2015). Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate, Elsevier, 212-224.
- Baeza, E.J., Pérez-Parra, J., López.J.C. y Gazquez,J.C. (2009). Manejo del clima en el invernadero Mediterráneo. Capítulo I: Ventilación Natural. IFAPA.
- Behunek, I. (2004). Accumulators for solar thermal energy storage. Disponible en:
https://www.fekt.vut.cz/conf/EEICT/archiv/sborniky/EEICT_2004_sbornik/03-Doktorske_projekty/04-Silnoprouda_elektrotechnika_a_elektroenergetika/01-xbehun01.pdf
- Berrones, M.; Garza, E.; Vazquez, E. y Mendez, R. (2013). Producción de Pimiento Morrón en casa malla para el sur de Tamaulipas. 2da edc. Las Huastecas, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap), 62.
- Bouchet, E. R., Freyre, C., Bouzo, C., y Favaro, J. (2007). Efecto de las dimensiones de un invernadero sobre la temperatura interna en períodos cálidos. *Revista Científica Agropecuaria*, 11(2): 111-119.
- Brazo, M. (2016). Sistema pasivo de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares. Sevilla, Universidad de Sevilla.
- Burciaga, J.A (2011). Diseño termo-económico del sistema de suministro energético para calefacción de invernadero agrícolas utilizando energía solar mediante simulación en

TRNSYS. Disponible en: <https://1library.co/document/q7wwj4rz-economico-suministro-energetico-calefacion-invernaderos-agricolas-utilizando-simulacion.html>

Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa. Reno. Universidad de Nevada

Choque, D. (2021). Evaluación de dos variedades de apio (*apium graveolens* L.) en tres densidades de trasplante en sistema hidropónico (nft), en el centro experimental de cota cota - la paz. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/25766/T-2855.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CIPER (2020). Manifiesto por la agricultura familiar: primera línea de la alimentación. Disponible en: <https://www.ciperchile.cl/2020/07/11/manifiesto-por-la-agricultura-familiar-primera-linea-de-la-alimentacion/>

CNE/PNUD/UTFSM (2008). IRRADIANCIA solar en territorios de la república de Chile. Disponible en: https://biblioteca.usm.cl/ld.php?content_id=39385748

Dorais, M, Papadopoulus, AP. y Gosselin, A (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*, 26, 239-319.

Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Disponible en: [https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman\(auth.\)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20\(2013\).pdf](https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman(auth.)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20(2013).pdf)

Fabrizio, E. (2012). Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection, *Elsevier*, 57-63.

FAO (2009). Coliflor. En línea. Disponible en: faostat.fao.org/produccionconsumo-verduras.html.

FAO. (2006). La calidad en frutas y hortalizas. En: Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas: del campo al mercado. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006>

- FAO (2002). El cultivo protegido en clima mediterráneo. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal n° 90. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 320 pp.
- Farzaneh-Gord, M., et al (2013). New method for applying solar energy in greenhouses to reduce fuel consumption, EBSCOHost, p. 64-75.
- Flores, J., Mejía, E., Montero, J. y Rojano, A. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia*, 45, 545–560.
- Fudholi, A., Sopian, K., Bakhtyar, B., Gabbasa, M., Othman, Y. y Ruslan, M. H. (2015).- Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51.
- Garreta, F. (et al) (2019). Introducción a la energía solar térmica Buenos Aires: Secretaría de Gobierno de Energía.
- Gassó, B.F. y Solomando, V. (2011). Estructura e instalaciones de un invernadero. Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gázquez, JC. (2008). El cultivo del tomate: Labores específicas del cultivo de tomate Disponible en http://www.mapa.mad.es/app/MaterialVegetal/Docs/LABORES_ESPECIFICAS_TOMATE.pdf
- Horticultura Efectiva (2014). Descripción del pepino. Disponible en: <http://www.horticulturaefectiva.net/2012/01/descripcion-delpepino.html>
- Kalogirou, S. (2014). Solar Energy Engineering: processes and systems, USA, Academic Press of Elsevier.
- Karagiorgas, M., Galatis, K., Tsagouri, M., Tsoutsos, T. y Botzios-Valaskakis, A. (2010). Solar assisted heat pump on air collectors: A simulation tool. *Solar Energy*, 84, 66–78.
- Lazaar, M., Kooli, S., Hazami, M., Farhat, A. y Belghith, A. (2004). Use of solar energy for the agricultural greenhouses autonomous conditioning. *Desalination*, 168, 169-175.
- Leal, J. (2015). Modelado del clima en invernaderos. Universidad de Nuevo León.
- Licon, L. y Copado, E., (2016). Construcción de Invernadero Sustentable. Instituto Tecnológico de Pachuca.

- López, F. (2016). Estado del Arte de Discos Parabólicos. Opciones de Almacenamiento en Receptor Solar. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90634/fichero/TFG+Estado+del+arte+de+discos+parab%C3%B3licos.+Opciones+de+almacenamiento+en+receptor+solar.pdf>
- Losada, J. (2009). Análisis de un sistema de disco parabólico con motor stirling. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/7869/Proyecto%20Dish%20Stirling.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Marabesi, M. (2007). Efeito do alto CO₂ no crescimento inicial e na fisiologia da fotossíntese em plântulas *Senna alata* (L.) Roxb. Instituto de Botânica. São Paulo. 78 p.
- Marín, P., Valera, D.L., Molina-Aiz, F.D., López, A., Belmonte, L.J. y Moreno, M.A. (2016). Influencia de diferentes sistemas de calefacción sobre el desarrollo, producción y calidad de un cultivo de tomate en invernadero. *ITEA*, 112(4), 375-391.
- Marín, M. (2013). Diseño de Invernaderos. Instrucciones Técnicas. Marín y Asociados. Disponible en: <https://marinponsasociados.com/PDFINDUSTRIA/disenoinvernaderos.pdf>
- Medina, M., y Lardizabal, R. (2011). Manual de Producción—Construcción de invernadero de bajo costo. Disponible en: http://bvirtual.infoagro.hn/xmlui/bitstream/handle/123456789/292/Acceso_Manual_Produccion_Construccion_Invernaderos_40_11.pdf?sequence=1
- Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L. y Álvarez, A.J. (2004). Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using Computational *Fluid Dynamics*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125, 33-51.
- Moreno, A., (2013). Mantenimiento y manejo de invernaderos, Ediciones Paraninfo, España.
- Nacif, J. (2011). Acumulación térmica para un sistema solar de calefacción activo. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104274/cfnacif_jh.pdf?sequence=3
- NAMA Chile (2020). Índice de precios de sistemas fotovoltaicos. Chile.

- Osório, T. y Carvalho, M. J. (2014) Testing of solar thermal collectors under transient conditions, *Solar Energy* (104), 71-81.
- Ramírez, M. (2015). Modelación y validación experimental de aporte solar/geotérmico a invernaderos. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Ramos, J. (2011). Consejos prácticos para invertir en invernaderos. Disponible en: http://www.aarfs.com.mx/imagenes/informacion/estudios/014_Consejos_practicos_pa_ra_invertir_invernaderos.pdf
- Revista Electricidad (2021). Proyectos fotovoltaicos: A fines de 2021 habrá más de 5.700 MW instalados. Disponible en: <https://www.revistaei.cl/informes-tecnicos/proyectos-fotovoltaicos-a-fines-de-2021-habra-mas-de-5-700-mw-instalados/#>
- Robles, J.; Aramendiz, H.; LLano, J. y Arzuaga, E. (2004). Agrupamiento de la berenjena (*Solanum melongena*) según sus características vegetativas. Informe parcial trabajo de investigación. Universidad de Córdoba, Montería, 7p.
- Rodríguez, F. (2002). Modelado y Control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. Universidad de Almería.
- Rojas, D., et al. (2008) Thermal performance testing of flat-plate collectors, *Solar Energy* (82), 746-757.
- Rosas, M. (2001). Energía Solar Térmica. España. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sandoval, U. (2020). Evaluación de cuatro enmiendas de fertilización en dos híbridos de repollo (*Brassica oleracea* var. capitata) en la comarca Tecolostote, municipio de San Lorenzo. Julio a octubre del 2019. Disponible en: <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnf04s194.pdf>
- Sanz De Galdeano, J., Uribarri, A., Sádaba, S., Aguado, G. y Del Castillo, J. (2003). Invernaderos y calefacción en Navarra. *Navarra Agraria*, 13- 23.
- Sarmiento, P. (2007). Energía solar en arquitectura y construcción. Santiago de Chile. RIL Editores.
- Sethi, VP. y Sharma, SK. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Elsevier. 82(9).

- Tang, R., Yang, Y. y Gao, W. (2011). Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles. *Solar Energy*, 85, 1381-1389.
- Tesi, R. (2001). Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo. Madrid. Mundi-Prensa, 288 pp.
- Urban, L. (1997). Introduction à la production sous serre. París. Tec & Doc-Lavoisier, 319 pp.
- Vallejo, A, y Estrada, E. (2004). Producción de hortalizas de clima cálido. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, 347 pp.
- Venegas, E. (2008). Sistema para generación y almacenamiento de calor de proceso mediante un concentrador solar de foco (COSPAA-90). Temixco, Morelos. Centro de investigación en energía.
- Vidriales, L. (2007). Colector de canal parabólico para la generación directa de vapor para calor de proceso. Temixco, Morelos Centro de investigación en energía.
- Zarza, E. (2003). Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos Proyecto Direct Solar Steam (DISS).