

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE MECATRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero en Mecatrónica*

PROYECTO TÉCNICO:

**“DISEÑO DE HUERTO AEROPÓNICO AUTOMATIZADO PARA
CULTIVO DE LA PAPA SOLANUM TUBEROSUM”**

AUTOR:

CARLOS MAURICIO ROJAS SARMIENTO

TUTOR:

ING. DIEGO RENÉ URGILÉS CONTRERAS, MSc.

CO-TUTORA:

ING. MÓNICA ALEXANDRA ROMERO SACOTO, MSc.

CUENCA – ECUADOR

2022

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Carlos Mauricio Rojas Sarmiento con documento de identificación N° 0107188112 manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: **“DISEÑO DE HUERTO AEROPÓNICO AUTOMATIZADO PARA CULTIVO DE LA PAPA SOLANUM TUBEROSUM”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero en Mecatrónica*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2022.

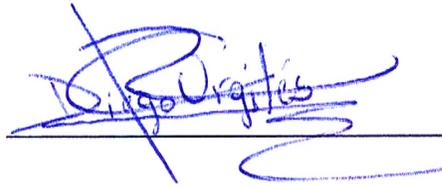


Carlos Mauricio Rojas Sarmiento
C.I. 0107188112

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO DE HUERTO AEROPÓNICO AUTOMATIZADO PARA CULTIVO DE LA PAPA SOLANUM TUBEROSUM”**, realizado por Carlos Mauricio Rojas Sarmiento, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2022.



Ing. Diego René Urgilés Contreras, MSc.
C.I. 0104431374

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Carlos Mauricio Rojas Sarmiento con documento de identificación N° 0107188112, autor del trabajo de titulación “**DISEÑO DE HUERTO AEROPÓNICO AUTOMATIZADO PARA CULTIVO DE LA PAPA SOLANUM TUBEROSUM**”, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, febrero del 2022.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'C. Rojas', is written over a horizontal dashed line.

Carlos Mauricio Rojas Sarmiento
C.I. 0107188112

Dedicatoria

El presente proyecto inicialmente se lo quiero dedicar a mis padres Julio y Susana, quienes con su esfuerzo y cariño han brindado el tesoro del estudio, a mis hermanos Marco, Paola, Bryam y Estefanía, quienes han sido apoyo incondicional en todo momento, a mi abuelita Chochi por todas enseñanzas que me ha dado.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mis padres quienes han sido siempre ese motor en mi vida para continuar, quienes con su infinito esfuerzo me han ayudado para culminar esta etapa de estudio.

A mis Tutores de Proyecto Ing. Diego Urgilés e Ing. Mónica Romero, por su predisposición a transmitir sus conocimientos y el apoyo brindado al actual trabajo de titulación. Sus orientaciones, conocimientos y su paciencia han sido esenciales para culminar con el presente.

A mis amigos cercanos quienes también han estado presentes para brindarme su apoyo y consejos.

A mi amigo Juan Diego Peralta.

Índice

Cesión de Derechos de Autor	I
Certificación	II
Declaratoria de Responsabilidad	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XII
Abstract	XIII
1. Introducción	1
2. Problema	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Descripción del problema	2
2.3. Importancia y alcances	4
2.4. Delimitación	5
2.4.1. Espacial	5
2.4.2. Temporal	5
2.4.3. Sectorial	5
2.5. Problema General	6
2.6. Problemas Específicos	6
3. Objetivos	6
3.1. Objetivo General	6
3.2. Objetivos Específicos	6
4. Hipótesis	6
4.1. Hipótesis General	6
4.2. Hipótesis Específicas	7
5. Matriz de Consistencia Lógica	8

6. Marco Teórico	9
6.1. Papa Solanum Tuberosum	9
6.1.1. Parámetros de desarrollo	9
6.1.2. Entorno de desarrollo	11
6.1.3. Riego	12
6.2. Cultivos sin suelo	12
6.2.1. Hidroponía	12
6.2.2. Aeroponía	13
6.2.3. Sistemas de control y monitoreo	14
7. Marco metodológico	14
7.1. Establecimiento de los criterios del dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum	14
7.1.1. Esquema general del proceso de producción de papa Solanum Tuberosum	14
7.1.2. Longitud de raíz	15
7.1.3. Longitud de planta	15
7.1.4. Área de cultivo para el desarrollo de la planta de papa	15
7.1.5. Peso de la planta	16
7.1.6. Densidad de plantado en aeroponía	16
7.1.7. Características del terreno	18
7.1.8. Dimensiones de la cámara aeropónica	19
7.1.9. Dimensionamiento de las variables de control	19
7.2. Propuesta de diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum	20
7.2.1. Propuesta del diseño mecánico	20
7.2.2. Matriz de Pugh	23
7.2.3. Selección de materiales	24
7.2.4. Esfuerzos estructurales	27
7.2.5. Análisis térmico	30
7.2.6. Análisis hidráulico	32
7.3. Propuesta de diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para cultivo de la papa Solanum Tuberosum	45
7.3.1. Parámetros de control de temperatura y humedad	45
7.3.2. Propuesta de control de temperatura y humedad	49
7.3.3. Matriz de Pugh	54

7.3.4.	Selección de componentes	55
7.3.5.	Esquema eléctrico del diseño de control	58
7.3.6.	Propuesta final	60
7.4.	Análisis del costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado en el cultivo de la papa Solanum Tuberosum	61
7.4.1.	Costos de insumos	61
7.4.2.	Costos de mano de obra técnica	62
7.4.3.	Costos indirectos	63
7.4.4.	Costo neto de implementación	63
7.4.5.	Análisis de Sensibilidad Escenario 1	64
7.4.6.	Análisis de Sensibilidad Escenario 2	67
8.	Resultados	70
8.1.	Parámetros establecidos para los criterios del dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum	70
8.1.1.	Boceto Seleccionado	70
8.1.2.	Estructura	70
8.1.3.	Tuberías	71
8.1.4.	Aislantes térmicos	71
8.2.	Propuesta de diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico en el cultivo de la papa Solanum Tuberosum	72
8.2.1.	Modelo matemático	72
8.2.2.	Esquema de control seleccionado	72
8.2.3.	Controlador seleccionado	72
8.3.	Análisis de costo de implementación del huerto aeropónico	73
8.3.1.	Costo neto de implementación	73
8.3.2.	Análisis de sensibilidad escenario 1	73
8.3.3.	Análisis de sensibilidad escenario 2	73
8.3.4.	Comparación de escenarios	74
9.	Conclusiones	76
10.	Recomendaciones	78
	Referencias	82

ANEXOS	82
Anexo A: Hoja de datos del tubo estructural cuadrado	83
Anexo B: Hoja de datos Tubería PVC Plastigama	84
Anexo C: Coeficientes K para pérdidas de accesorios en tuberías	85
Anexo D: Manual de controlador MT-530e Plus	86
Anexo E: Catálogo Enfriadores de calor	87
Anexo F: Catálogo panel solar	88
Anexo G: Deformación total	89

Lista de Tablas

1.	Matriz de consistencia.	8
2.	Extracción total de nutrientes por cultivo de papa para diferentes niveles de producción	10
3.	Producción de minitubérculos y características.	17
4.	Matriz de Pugh para bocetos propuestos.	24
5.	Características del tubo cuadrado.	25
6.	Selección de los aislantes térmicos.	26
7.	Selección material hermético.	27
8.	Relación de masa de tubérculo semilla y de cosecha.	28
9.	Selección del Aspersor.	33
10.	Valores de Temperatura vs Humedad Específica.	47
11.	Valores de Humedad Específica vs Densidad.	48
12.	Matriz de Pugh para propuestas de control.	54
13.	Características de los controladores.	55
14.	Características de la electroválvula	57
15.	Características del CF800	57
16.	Características de la bomba hidráulica	58
17.	Materia prima e insumos.	61
18.	Costo de mano de obra técnica.	62
19.	Costos indirectos del sistema propuesto.	63
20.	Costo total de implementación.	63
21.	Rendimiento Probable.	64
22.	Escenario exitoso de costos.	65
23.	Ingresos.	65
24.	Estado de gastos.	66
25.	Estado de flujos de efectivo.	66
26.	Análisis de Sensibilidad fluctuante de -20% a 20%	67
27.	Costo total de implementación 2.	67
28.	Escenario exitoso de costos 2.	68
29.	Estado de gastos.	68
30.	Estado de flujos de efectivo 2.	69
31.	Análisis de Sensibilidad (Escenario 2).	69
32.	Comparación de desviación escenario 1 y 2	75

Lista de Figuras

1.	Esquema sistema Hidropónico.	13
2.	Esquema sistema aeropónico.	13
3.	Diagrama de proceso manual de producción de papa Solanum Tuberosum.	15
4.	Espaciamiento entre mini tubérculos según la densidad por planta y por m^2	17
5.	Dimensión del invernadero.	18
6.	Primera propuesta de diseño.	21
7.	Segunda propuesta de diseño.	22
8.	Tercera propuesta de diseño.	23
9.	Perfil de tipo cuadrado.	25
10.	Aislantes térmicos.	27
11.	Esfuerzo - Deformación del análisis estructural.	29
12.	Perfil de tipo cuadrado.	30
13.	Nebulizador Agrícola Maruplast.	33
14.	Diagrama de tuberías internas.	34
15.	Distribución de tuberías externas.	40
16.	tabla psicrométrica Online	46
17.	Temperatura vs Humedad específica.	47
18.	Humedad específica vs Densidad.	48
19.	Diagrama de flujo de control de humedad y temperatura propuesta 1.	51
20.	Diagrama de flujo de control de humedad y temperatura propuesta 2.	53
21.	Controlador Marca Full Gauge modelo MT-530e Super	56
22.	diagrama de bloque del controlador	56
23.	Electroválvula Baomain	57
24.	Chiller CF800	57
25.	Bomba hidráulica Leo	58
26.	Diagrama de conexiones eléctricas	59
27.	Diseño del invernadero implementado	60
28.	Diseño de la cámara aeropónica	60
29.	Diseño de la cámara aeropónica (acercamiento)	60
30.	Análisis de Sensibilidad Escenario 1.	73
31.	Análisis de Sensibilidad Escenario 2.	74
32.	Comparación de sensibilidad.	75

Resumen

En el presente proyecto de titulación se plantea el diseño de un huerto aeropónico automatizado destinado al cultivo de papa *Solanum Tuberosum* con el propósito de mejorar el proceso de cultivo mediante condiciones controladas, debido a que la operación a campo abierto presenta inconvenientes a lo largo del ciclo de cultivo.

Este proyecto se encuentra enfocado a los diversos agricultores de la zona andina del Ecuador, debido a factores climáticos el cultivo no es eficiente y esto se deriva en fluctuantes costos de producción, pérdidas económicas para el agricultor, deficiente calidad de papa, entre otros. Por lo cual se plantea el diseño de un módulo que contenga a la planta de papa enfocándose en sus raíces donde se genera el tubérculo.

Finalmente, con los parámetros de cultivo de la planta de papa se efectuaron tres bocetos y mediante una tabla de priorización se hizo la elección de la mejor propuesta, posterior a ello se realizaron cálculos mecánicos, simulaciones, modelos de automatización para el control de parámetros, y el análisis de costos de implementación mediante análisis de sensibilidad para viabilizar el proyecto con el fin de validar la propuesta de diseño.

Palabras clave: Aeroponía, automatización, Control de humedad, control de temperatura, Papa *Solanum Tuberosum*.

Abstract

This graduation project poses the design of an automated aeroponic farm for the farming of the *Solanum tuberosum* potato, with the purpose of improving the farming process through controlled conditions, since this open field operation presents problems throughout the farming cycle .

This project is focused on farmers in the Andean region of Ecuador. Because of climatic factors, farming is not efficient, and it derives in fluctuating production costs, economic losses for the farmer, poor potato quality, among others. Therefore, the design of a module that contains the potato plant is proposed, focusing on its roots where the tuber is produced.

Finally, with the farming parameters of the potato plant, three sketches were proposed, and through a prioritization table, the choice of the best proposal was made. Accordingly, mechanical calculations, simulations, automation models for parameter control, and the analysis of implementation costs through a sensitivity analysis were implemented to make the project viable with the end goal of to validating the design proposal.

Keywords: Aeroponics, automation, Humidity control, temperature control, Potato *Solanum Tuberosum*.

1. Introducción

En la actualidad las labores de cultivo de alimentos se está volviendo un reto para los agricultores por los factores climáticos, cada vez es mas incierto si lloverá toda una temporada para asegurar la humedad en el suelo arado y así garantizar el desarrollo de la planta. Además, los terrenos cultivados, en su mayoría se lo realiza para monocultivo, es decir, un solo tipo de planta, cuestión que empobrece los nutrientes del suelo y se ven envueltos en la necesidad de utilizar fertilizantes y otros agroquímicos en mayor cantidad conforme pasan los años para asegurar que el cultivo tenga los nutrientes necesarios.

Tanto la calidad del suelo como las precipitaciones fluviales y la temperatura son factores que intervienen en el ciclo de cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*. Una mala calidad del suelo hará que la papa no absorba los nutrientes necesarios, vitales para una buena cosecha; las precipitaciones en poca cantidad limita la humedad del suelo lo que se traduce en baja absorción de agua y desarrollo de pocos tubérculos, en cambio el exceso de humedad da paso a la aparición de plagas, hongos y bacterias que afectan el cultivo pudiendo echar a perder toda la producción.

La aeroponía junto con la hidroponía son los métodos mas modernos de producción de alimentos en la actualidad proveyendo de nutrientes en todo el ciclo de cultivo, además de, un ahorro importante de recursos, como lo son los hídricos. La FAO estima que para la producción de un kilogramo de tubérculo de papa se puede gastar mas de 25 litros de agua, es por esta razón y otras más que el cultivo de tubérculo de papa en aeroponía es una buena opción para garantizar una producción óptima exenta de pesticidas usados comúnmente en cultivos tradicionales.

A continuación se presenta una investigación cuantitativa, en la que se ha estudiado la distribución óptima de plantado por metro cuadrado de la papa *Solanum Tuberosum*, posterior a ello, una selección de materiales para la creación de un sistema cerrado que habilite el control de las condiciones de cultivo. finalizando en un análisis de costos de implementación.

2. Problema

2.1. Antecedentes

En el artículo “Comparison of of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers” presentado por Ritter y colaboradores (2001), menciona que mediante cultivos aeropónicos se obtuvo un rendimiento 70% mayor por planta y un número de tubérculos 2.5 veces mayor respecto a sistemas de cultivos hidropónicos.

En el artículo publicado “Potential of aeroponics system in the production of quality potato (*Solanum Tuberosum* L.) seed in developing countries” menciona la mejora genética de los tubérculos semilla mediante sistemas aeropónicos, donde la calidad, cantidad y tiempo de producción de estas se ven incrementadas frente al método de cultivo en suelo. (Chiipanthenga y colaboradores, 2012)

En un estudio realizado por (Nichols, 2009) del Institute of Natural Resources de la Universidad de Massey en Nueva Zelanda, se comparó la productividad de mini tubérculos de papa utilizando cuatro sistemas: 1) Tratamiento control en medio de corteza, 2) Sistema hidropónico de flujo profundo, 3) Sistema NFT, y 4) Sistema aeropónico; siendo este último el de mejores prestaciones, evidenciándose en mayor producción y rendimiento por planta para la producción de mini tubérculos.

2.2. Descripción del problema

El método tradicional de cultivo de la papa *Solanum Tuberosum* conlleva muchos problemas al momento de su producción. La demanda de este alimento tiene sus raíces en el periodo incaico, donde el consumo de este alimento fue decisivo para el sostenimiento del imperio. Por esta razón histórica, en la actualidad es parte fundamental de la canasta básica familiar.

Para la siembra de este tubérculo, los costos de producción por hectárea son elevados, donde el costo más representativo se encuentra en fertilizantes y agroquímicos para control fitosanitario (FAO, 2008; INIAP, 2014).

En el año 2019, según cifras del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el

60.2% de la producción se dio entre las provincias de Carchi, Cotopaxi y Chimborazo, y el 39.8% en el resto del país. El precio por quintal de este producto dependiendo de su variedad puede oscilar según la región llegando a tener un valor de entre 28 y 36 dólares en el norte y entre 41 y 52 dólares en el sur del país, debido a sus costos de producción, transporte, entre otros (Cobos, 2019; Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2021).

Sumado a esto, factores como: clima, temperatura, altitud, suelos, nutrientes, enfermedades, plagas, entre otros, intervienen en el desarrollo de la planta y tuberización, además de la calidad y cantidad de producción. Para asegurar una buena producción se debe partir de un tubérculo semilla de buena calidad, correcta fertilización de suelos y control fitosanitario. Para ello se debe contar con un respectivo análisis de los lotes a cultivar (H. Andrade, Odilie, y Sherwood, 2002; Cortez y Hurtado, 2002).

En Ecuador, alrededor del 80% de los suelos cultivados con papa son de origen volcánico, con alta fijación de fósforo y altos niveles de materia orgánica, donde el 50% de los suelos tiene contenidos bajos de nitrógeno, el 80% tiene contenidos bajos de fósforo y el 70% niveles altos de potasio, calcio y magnesio. En el caso de los micro-nutrientes existen deficiencias comunes para zinc, manganeso y boro (Pumisacho y Sherwood, 2002).

El pH de los suelos utilizados para el cultivo de papa se encuentra entre ácidos y ligeramente ácidos. La papa cultivada en este suelo tiene dificultad en absorber la mayoría de los nutrientes que demanda para su desarrollo, esto hace que nutrientes propios del suelo no sean asimilados por las raíces haciendo necesaria la fertilización cada cierto periodo de tiempo (H. Andrade y cols., 2002).

Según Pumisacho y Sherwood (2002), es importante señalar el manejo de plagas y enfermedades, las cuales son factores determinantes. Para la aplicación de pesticidas el agricultor debe estar muy bien informado sobre su uso y las repercusiones que puede tener el mal manejo en el sembrío, y por otra parte los daños a la salud humana. Para ello se necesita evaluar diversos balances agro-ecológicos en el cultivo como, por ejemplo:

- Existencia de un nivel elevado de plagas que justifique su uso.
- Existencia de mecanismos naturales que puedan limitar el efecto o la densidad de las poblaciones de plaga.

- Analizar si el efecto de daño real es considerable como para afectar los rendimientos.

Dado que, pueden ser diferentes los tipos de plaga que atacan al cultivo, se debe tener un estricto control para evitar que estos puedan generar resistencia como es el caso de la *Phytophthora Infestans*, que es un hongo que puede llegar a dañar el 100% de la plantación en muy poco tiempo (Cortez y Hurtado, 2002).

Para controlar el proceso de producción y enfermedades de la papa se han aplicado diferentes técnicas de cultivo que han presentado buenos resultados y son solución a los problemas antes mencionados, entre uno de estos métodos de innovación tecnológica de cultivos se encuentra el aeropónico que consiste en un cultivo sin suelo donde la raíz de la planta se desarrolla suspendida en un sistema cerrado.

Como se ha podido analizar, el cultivo de este tubérculo sugiere la implementación de procesos adecuados, es por ello por lo que esta investigación pretende diseñar un sistema de cultivo aeropónico. Para el diseño de este sistema dependerá de ciertos parámetros en relación con las necesidades del agricultor o empresa. A continuación, se detalla los parámetros a considerar:

1. **Ambiente cerrado:** Condiciones controladas del ambiente mediante un invernadero para el control de variables ambientales.
2. **Área de cultivo:** El sistema se debe acoplar al espacio de cultivo para cada agricultor además de la pendiente del terreno.
3. **Control radicular:** En conocimiento de las condiciones de cultivo de la planta, en particular las raíces, se adecua un sistema de control que permita el óptimo desempeño y desarrollo del tubérculo.

La aeroponía ofrece el potencial de mejorar la producción y reducir los costos en comparación con los métodos convencionales, este método explota eficientemente el espacio vertical del invernadero y el balance humedad-aire para optimizar el desarrollo de raíces, tubérculos y follaje (Otazú, 2010).

2.3. Importancia y alcances

Según cifras de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en la actualidad la población mundial actual es de 7.700 millones de personas, y se prevé que para el 2050 sean

9.700 millones y para el 2100 se llegue al pico de la población con 11.000 millones. Además según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2002), el 70% del agua dulce en el mundo se lo destina a la producción de alimentos, tanto que para producir una papa se necesitan 25 litros de agua.

A medida que la población incrementa, los recursos se hacen mas limitados y con ello menor disponibilidad a alimentos. Nuevos métodos de cultivo como la aeroponía permiten ahorrar y optimizar recursos mediante un sistema cerrado.

Con lo mencionado anteriormente, la aplicación de aeroponía en el cultivo de tubérculos de papa ha demostrado que bajo condiciones controladas la producción puede mejorarse significativamente tanto en rendimiento como en la genética de la papa (Lakhiar, Gao, Syed, Chandio, y Buttar, 2018). Es por ello la importancia de realizar investigaciones sobre este método de cultivo que se pueda aplicar para la sostenibilidad alimentaria de la actualidad y del futuro.

En primera instancia, esta investigación se dará un alcance descriptivo donde se aplicarán conceptos teóricos sobre sistemas de cultivo aeropónicos y a partir de esto se realizará un diseño de un ambiente controlado para el desarrollo de la planta en función de diversas variables que intervienen en el óptimo proceso de cultivo.

2.4. Delimitación

2.4.1. Espacial

El presente proyecto de titulación, con enfoque cuantitativo se ha destinado al sector agrícola de la provincia del Azuay, cantón Cuenca.

2.4.2. Temporal

El desarrollo del presente proyecto de titulación se llevó a cabo en los meses de Octubre de 2021 hasta febrero del año 2022, dividiendo así las actividades en segmentos enfocados a: recopilación de información, el diseño mecánico, de control y análisis de costos de implementación.

2.4.3. Sectorial

El proyecto de titulación se destinará al sector agrícola de la zona andina del Ecuador.

2.5. Problema General

- ¿Es posible diseñar un huerto aeropónico automatizado para la producción de la papa Solanum Tuberosum?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Se podrá establecer los criterios para el dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum ?
- ¿Es posible proponer el diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum?
- ¿Es factible analizar el costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Diseñar un huerto aeropónico automatizado para la producción de la papa Solanum Tuberosum.

3.2. Objetivos Específicos

- Establecer los criterios para el dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.
- Proponer el diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.
- Analizar el costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.

4. Hipótesis

4.1. Hipótesis General

- Se diseñará un huerto automatizado para la producción de papas Solanum Tuberosum.

4.2. Hipótesis Específicas

- Se establecerá los criterios para el dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*.
- Se propondrá el diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*.
- Se analizará el costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*.

5. Matriz de Consistencia Lógica

Tabla 1: Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Es posible diseñar un huerto aeropónico automatizado para la producción de la papa Solanum Tuberosum?	Diseñar un huerto aeropónico automatizado para la producción de la papa Solanum Tuberosum.	Se diseñará un huerto aeropónico automatizado para la producción de papas Solanum Tuberosum.	-VI: Diseño. -VD: Producción de papa Solanum Tuberosum.	Diseño mecánico y de control Aeroponía Producción de papas
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Se podrá establecer los criterios para el dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum?	Establecer los criterios para el dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.	Se establecerá los criterios para el dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.	-VI: Criterios. -VD: Dimensionamiento.	Papa Solanum Tuberosum Criterios de cultivo Densidad de plantado
¿Es posible proponer el diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.	proponer el diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.	Se propondrá el diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.	-VI: Humedad y temperatura. -VD: Diseño de control.	Modelos de control de humedad y temperatura.
¿Es factible analizar el costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum?	Analizar el costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.	Se analizará el costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa Solanum Tuberosum.	-VI: Implementación. -VD: Costo.	Costos de materias primas

Fuente: Autor.

6. Marco Teórico

6.1. Papa Solanum Tuberosum

La papa (*Solanum Tuberosum*) es una herbácea anual que alcanza la altura de un metro y produce un tubérculo, la papa misma, con tan abundante contenido de almidón que ocupa el cuarto lugar mundial en importancia como alimento, después del maíz, el trigo y el arroz. La papa pertenece a la familia de floríferas de las solanáceas, del género *Solanum* (FAO, 2008).

En 1994, el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) realizó una colección de papas cultivadas en el Ecuador, y encontró más de 400 diferentes tipos entre especies andígena y phureja. Sin embargo, en el país sólo comúnmente se siembran 30 cultivares, de los cuales las variedades INIAP Gabriela y Superchola representan más de la mitad del área sembrada (Pumisacho y Sherwood, 2002).

6.1.1. Parámetros de desarrollo

Para el desarrollo de la planta es necesario tener en cuenta algunos aspectos importantes, los cuales se presentan a continuación.

6.1.1.1. Nutrientes

La extracción de nutrimentos del suelo para el cultivo de papa depende de la variedad, fertilidad del suelo, condiciones climáticas, rendimiento y manejo del cultivo. La extracción total de fósforo es inferior a la de nitrógeno y potasio. Sin embargo, debido al alto grado de fijación del fósforo en los suelos del país, las cantidades de fertilizantes fosfatados aplicados al suelo en Ecuador son mayores a las de nitrógeno y potasio. En la tabla 2 se muestra la demanda nutricional del cultivo de papa y en la cual se presenta a partir de los 50 días, cuando inician la tuberización y crecimiento del follaje (Pumisacho y Sherwood, 2002).

Tabla 2: Extracción total de nutrientes por cultivo de papa para diferentes niveles de producción.

Rendimiento t/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	Mn
	kg/ha						g/ha			
Ecuador										
17	70	15	140	25	10		400	35	1.050	200
50	220	50	350	95	35		900	60	4.600	550
Colombia										
20	120	40	250		20	10				
40	210	70	430		40	20				
50	300	100	600		60	25				

Fuente: (Pumisacho y Sherwood, 2002).

6.1.1.2. Nitrógeno

Es considerado como uno de los elementos más importantes en la nutrición de las plantas, es constituyente de la clorofila y está involucrado en el proceso de fotosíntesis. Es componente de las vitaminas y aminoácidos que forman proteínas. La papa puede absorber N en forma nítrica (NO_3^-) y amoniacal (NH_4^+). Sin embargo, la planta presenta mayores tasas de crecimiento cuando hay mayor disponibilidad de nitratos (Pumisacho y Sherwood, 2002).

Una deficiencia de N reduce la producción de clorofila y produce clorosis en las hojas viejas de la planta. Según la severidad de la deficiencia, la clorosis avanza a las hojas más jóvenes y finalmente puede afectar el crecimiento total de la planta. Dosis excesivas de nitrógeno en papa pueden prolongar el ciclo vegetativo, reducir el porcentaje de materia seca de los tubérculos, provocar acame y aumentar la susceptibilidad de la planta a enfermedades (Pumisacho y Sherwood, 2002).

6.1.1.3. Fósforo

Es un elemento crítico durante el periodo inicial de desarrollo de la planta y de tuberización. Las plantas absorben fósforo principalmente en forma de iones ortofosfatos primarios o secundarios ($H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}) que están presentes en la solución del suelo. La cantidad de cada forma depende del pH en la solución del suelo. El P es esencial para la calidad y

rendimiento de los cultivos. Contribuye a los procesos de fotosíntesis, respiración, almacenamiento y transferencia de energía, división y crecimiento celular, y transferencia genética. El P promueve la rápida formación de tubérculos y crecimiento de las raíces. Mejora la resistencia a las bajas temperaturas, incrementa la eficiencia del uso de agua, contribuye a la resistencia a enfermedades y acelera la madurez (Pumisacho y Sherwood, 2002).

Una deficiencia de fósforo retarda el crecimiento apical, dando lugar a plantas pequeñas y rígidas. Se reduce la formación de almidón en los tubérculos, contribuyendo a la formación de manchas necróticas de color castaño-herrumbre, distribuidas en forma dispersa en toda la pulpa (Pumisacho y Sherwood, 2002).

6.1.1.4. Potasio

El potasio en las plantas es vital para la fotosíntesis, especialmente en la síntesis de proteínas. Es importante para la descomposición de carbohidratos para producir energía, ayuda a controlar el balance iónico y contribuye a la translocación de metales pesados como Fe. Además, da resistencia a enfermedades, como la fusariosis y la mancha negra del tubérculo. El K es un activador de los sistemas enzimáticos que regulan el metabolismo de la planta, como la apertura y cierre de las estomas lo cual contribuye a la resistencia de sequía (Pumisacho y Sherwood, 2002).

6.1.1.5. Azufre

El S ayuda a desarrollar enzimas y vitaminas vegetales. Contribuye al proceso de formación de la clorofila, y está presente en varios compuestos orgánicos de la planta. Los síntomas de deficiencia en S son similares a los de falta de N. Presenta un color verde pálido en las hojas más jóvenes. Cuando la deficiencia de S es severa, la sintomatología se generaliza en toda la planta (Pumisacho y Sherwood, 2002).

6.1.2. Entorno de desarrollo

Para la siembra de la semilla se debe depositar a una distancia entre 25 y 40cm entre ellas a una profundidad de 30 a 35cm. Por otra parte, si la semilla es pequeña o menor a 60gramos, se debe depositar de 2 a 3 tubérculos por sitio (INIAP, 2014).

6.1.3. Riego

La frecuencia de los ciclos de riego depende de la naturaleza de la planta; etapa de crecimiento de la planta; condiciones climáticas (invernaderos), particularmente intensidad de luz, duración del día y temperaturas; y tipo de medio. Las plantas más suculentas con abundancia de hojas requieren un riego más frecuente, ya que pierden agua rápidamente por la evapotranspiración de sus hojas. Cuanto mayor sea el área de las hojas, más agua consumirán. A medida que las plantas maduran, producen una gran copa de hojas y desarrollan frutos, su demanda de agua aumenta (Resh, 2012).

Un cultivo de papa localizado a 3.000 msnm necesita entre 600 y 700 mm de agua, distribuida en forma más o menos uniforme a lo largo del ciclo vegetativo. La etapa crítica, durante la cual no debe faltar agua, corresponde al periodo de floración-tuberización. En las condiciones de la sierra, en que por ciclo existen 700 a 800 mm bien distribuidos, el riego no es indispensable excepto en periodos de sequía prolongada. Cuando se realizan cultivos de verano es importante la dotación de agua con riegos frecuentes y ligeros, especialmente en la época de floración-tuberización (Pumisacho y Sherwood, 2002).

6.2. Cultivos sin suelo

6.2.1. Hidroponía

El término “hidroponía” proviene de la palabra griega “hydro” que significa agua y “pónos” que significa trabajo. La producción hidropónica de los cultivos se caracteriza por la propagación en soluciones de agua y nutrientes, que se pueden configurar con o sin la adición de un medio de crecimiento para proporcionar soporte mecánico al sistema radicular de la planta. Para proporcionar apoyo físico, a veces se utilizan medios vegetales naturales o artificiales como carbón vegetal, lana de roca, gránulos de arcilla, musgo de turba, grava o macetas, aserrín y cáscaras de coco (Tunio y colaboradores, 2020).

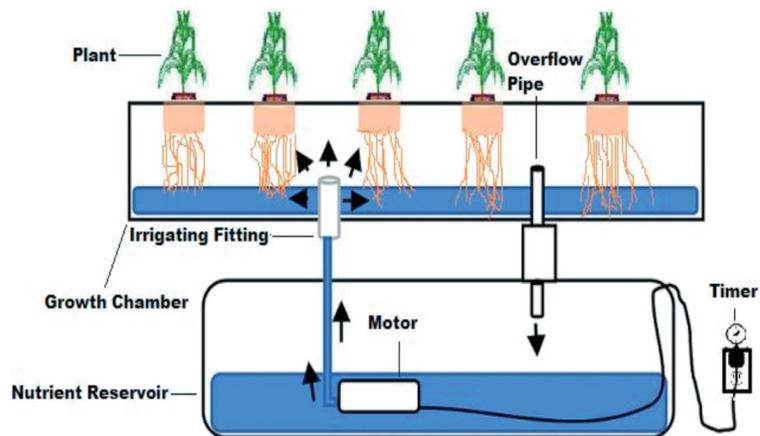


Figura 1: Esquema sistema Hidropónico.

Fuente: (Tunio y colaboradores, 2020).

6.2.2. Aeroponía

La aeroponía es el cultivo de plantas en un recipiente opaco o contenedor de soporte en el que sus raíces se suspenden en el aire y se bañan en una neblina de nutrientes en lugar de una solución de nutrientes. Este cultivo se usa ampliamente en estudios de laboratorio en fisiología vegetal (Resh, 2012). No necesitan una sola partícula de suelo o sustrato para soportar las plantas. El término “aeroponía” proviene del latín “aero” que significa aire y “pónos” que significa trabajo y es otro método de cultivo sin suelo para el cultivo de plantas en un ambiente controlado (Tunio y colaboradores, 2020).

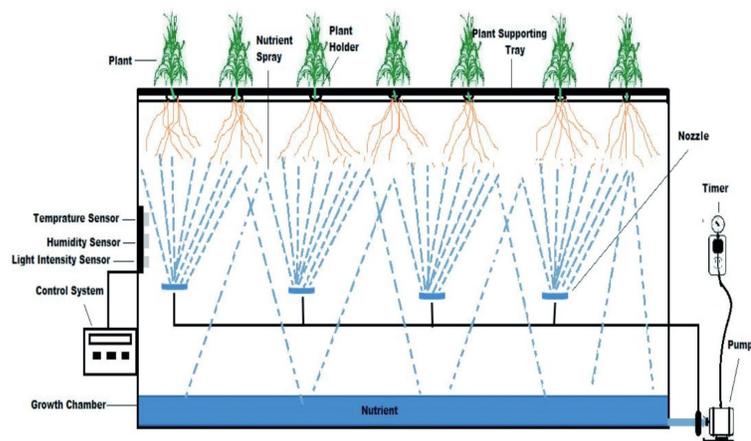


Figura 2: Esquema sistema aeropónico.

Fuente: (Tunio y colaboradores, 2020).

6.2.3. Sistemas de control y monitoreo

6.2.3.1. Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura son componentes eléctricos y electrónicos que, en calidad de sensores, permiten medir la temperatura mediante una señal eléctrica determinada. Dicha señal puede enviarse directamente o mediante el cambio de la resistencia. También se denominan sensores de calor o termosensores. Un sensor de temperatura se usa, entre otras aplicaciones, para el control de circuitos. Los sensores de temperatura también se llaman sensores de calor, detectores de calor o sondas térmicas (Sensors, 2021).

7. Marco metodológico

El desarrollo de este proyecto de titulación se enfoca en tres temas puntuales en el diseño de un huero aeropónico automatizado para el cultivo de planta de papa. Con esta premisa, en el primer y segundo subtema se va enfocar en la caracterización de las propiedades fenológicas y de cultivo de la papa *Solanum Tuberosum* para así obtener el diseño mecánico y de control de un módulo para aeroponía adecuado para la producción. Finalmente como último apartado se analizará el costo de la implementación del sistema con los materiales seleccionados producto del los subtemas anteriores.

7.1. Establecimiento de los criterios del dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*

A través de las investigaciones realizadas de diferentes tipos de autores se conoce que la distribución de papas corresponde a necesidades espaciales del desarrollo de la planta y en función de la optimización del espacio del cajón para aeroponía.

7.1.1. Esquema general del proceso de producción de papa *Solanum Tuberosum*

En la figura 3, se observa un esquema general del proceso manual de producción de papa, esta comienza con la preparación de la tierra hasta llegar a su cosecha, es importante mencionar que cada una de estas fases tienen un proceso a seguir.

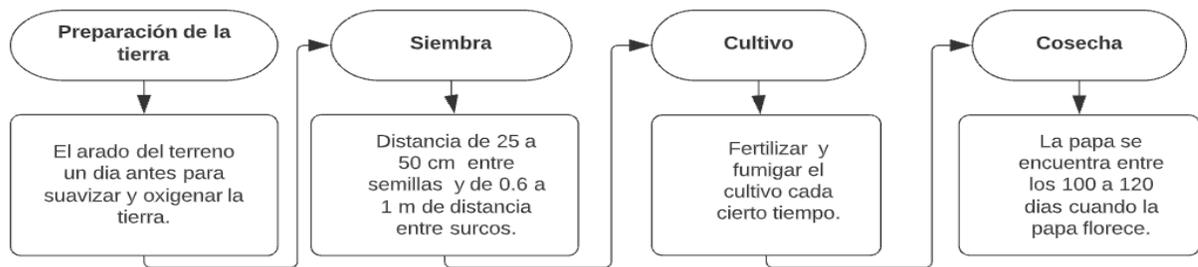


Figura 3: Diagrama de proceso manual de producción de papa *Solanum Tuberosum*.

Fuente: Autor.

7.1.2. Longitud de raíz

Según YARA, la planta de papa al producir un sistema radicular fibroso el tamaño de estas alcanza una longitud aproximada de 0.60m. Por otra parte Villanueva e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, menciona un sistema de raíces fibrosas que puede alcanzar 0.80 m de profundidad del suelo.

7.1.3. Longitud de planta

Según Centro Internacional de la Papa (CIP), establece que el tamaño de la planta puede crecer hasta una altura de 1 m, pudiendo llegar a la producción de 20 tubérculos por planta, por otro lado Pumisacho y Sherwood, determina que el follaje de la planta puede alcanzar una altura entre 0.60 a 1.50 m.

7.1.4. Área de cultivo para el desarrollo de la planta de papa

Según Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, el cultivo en suelo plantea un espacio de siembra entre planta-planta entre 0.30 m a 0.40 m y entre líneas de 0.60 a 0.70 m y en suelos más sueltos entre 0.80 a 0.90 m. Por otro lado Vignola y colaboradores, establecen que el espacio de plantado entre surcos es de 0.70 a 1 m y un espacio entre plantas de 0.15 a 0.25 m en función del tamaño del tubérculo semilla, por último Pumisacho y Velásquez define que este parámetro se determina teniendo en cuenta la cantidad de plantado y espaciamiento entre que plantas varía entre 0.25 a 0.40 m, menor distancia cuando es para semilla y mayor espacio cuando es para producción.

7.1.5. Peso de la planta

Según el estudio realizado por Punina (2014), menciona la evaluación agronómica entre fertilizantes y el rendimiento de tubérculos por planta, estableciendo así distintos rendimientos para cada fertilizante, los cuales fluctuaron entre 1.91 kg/planta y 4.11 kg/planta obteniendo un promedio de 2.81 kg/planta.

7.1.6. Densidad de plantado en aeroponía

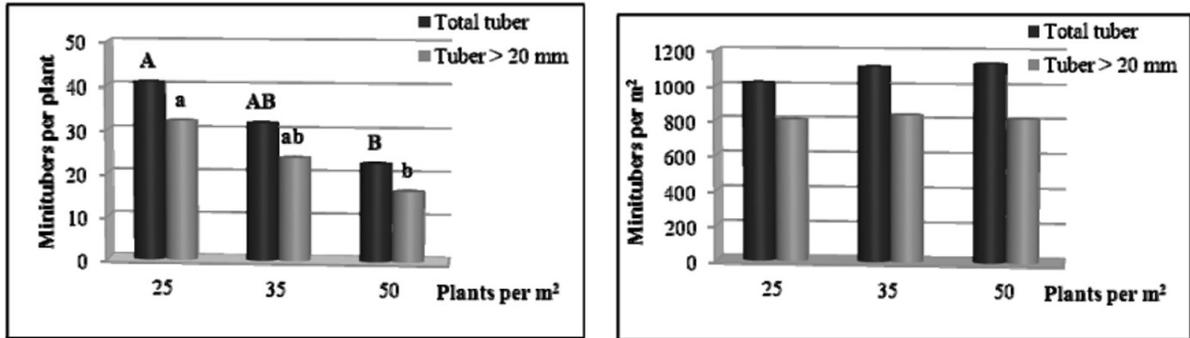
En el artículo presentado por Farran y Mingo-Castel (2006), se muestra un estudio realizado de producción de mini tubérculos de papa Zorba con dos densidades de plantación: la primera con 60 plantas/m² y la segunda con 100 plantas/m². El desempeño se evidenció en una menor densidad de plantado, sin embargo, la producción con una alta densidad por metro cuadrado se puede dar exclusivamente para la producción de tubérculos semilla ya que en esta experimentación el ciclo de cultivo se prolongó por más tiempo.

El dato anterior se corrobora con un estudio realizado por Wang y cols. (2017), menciona que de la misma forma para la producción de tubérculos semilla en papa Andígena, se realizaron mediante tres experimentos: el primero con la composición de solución nutritiva, el segundo con densidad de plantas y el tercero con una frecuencia de nebulización y cosecha. Bajo estos determinados ámbitos, el mejor desempeño dentro de distintas densidades (16, 26, 44, 54, 63, 80 y 95 plantas/m²) se dio en 63 plantas/m², sin embargo, menciona un rendimiento menor, esto quiere decir que los tubérculos producidos son más pequeños.

En el artículo “*Potato minituber production at different plant densities using an aeroponic system*”, presenta un estudio en el que se pone a prueba el rendimiento de plantado de mini tubérculos de papa mediante aeroponía en el cultivo de papa *Solanum Tuberosum* con tres densidades de plantado que iban entre 25, 35 y 50 plantas por metro cuadrado (m²), donde el mayor rendimiento se evidenció en la densidad de 25 plantas por m² de dos a tres veces más que en las otras dos densidades respectivamente (Abdullateef, Böhme y Pinker, 2010).

En la figura 4a se evidencia la cantidad de minitubérculos producidos por planta para cada densidad. En la figura 4b por el contrario a la figura 4a se muestra la cantidad de tubérculos producidos por metro cuadrado, de este gráfico se puede deducir que, a mayor densidad la producción de tubérculos por planta disminuye, pero se ve compensada por el número de plantas por metro cuadrado, además no es significativa la diferencia entre la cantidad de

tubérculos cosechados. Los resultados de este estudio se muestran en la tabla 3 que demuestra que no existe mayor relevancia en la densidad de plantado dado que las diferencias entre estas son despreciables (Abdullateef, Böhme y Pinker, 2010).



(a) Efecto de la densidad producidos por planta. (b) Efecto de la densidad de plantas en producción por m^2 .

Figura 4: Espaciamiento entre mini tubérculos según la densidad por planta y por m^2 .

Tabla 3: Producción de minitubérculos y características.

Plantas por m2	Peso del tubérculo (Kgm^2)	Peso del tubérculo (g plant1)	Tubérculo >20 mm (g/tuber)	Tubérculo >20 mm por planta		Tubérculo >20 mm por m^2	
				Número	Peso (g)	Número	Peso (Kg)
25	12,0*	479,5 a	11,8 a	32,2 a	446 a	804,3*	11,1*
35	11,9*	341,5 b	10,8 ab	23,8 b	320 b	832,9*	11,2*
50	11,3*	226,1 c	10,0 b	16,3 c	208 c	813,7*	10,4*

Fuente: (Abdullateef, Böhme y Pinker, 2010).

De estos estudios se ha considerado con datos de mayor relevancia la investigación de Abdullateef, Böhme y Pinker, ya que realiza el estudio con la misma especie de tubérculo trabajado en este proyecto, y teniendo en cuenta la tabla 3 que muestra similitud en tres distintas densidades, con ello se ha tomado una densidad de plantado de 30 plantas por metro cuadrado, con ello se asegura la misma o mayor producción y un rendimiento cercano como en la densidad de 25 plantas (Abdullateef, Böhme y Pinker, 2010).

7.1.7. Características del terreno

7.1.8.1. Características del terreno a implementar

- **Ubicación:** Cuenca.
- **Elevación:** 2560 m.
- **Área:** 150 m².

7.1.8.2. Dimensiones del invernadero

En la figura 5, se establece las dimensiones sobre las cuales se va a implementar los módulos aeropónicos, siendo la extensión del terreno de: largo 15 m, ancho 10 m y una altura estándar de 5 m.

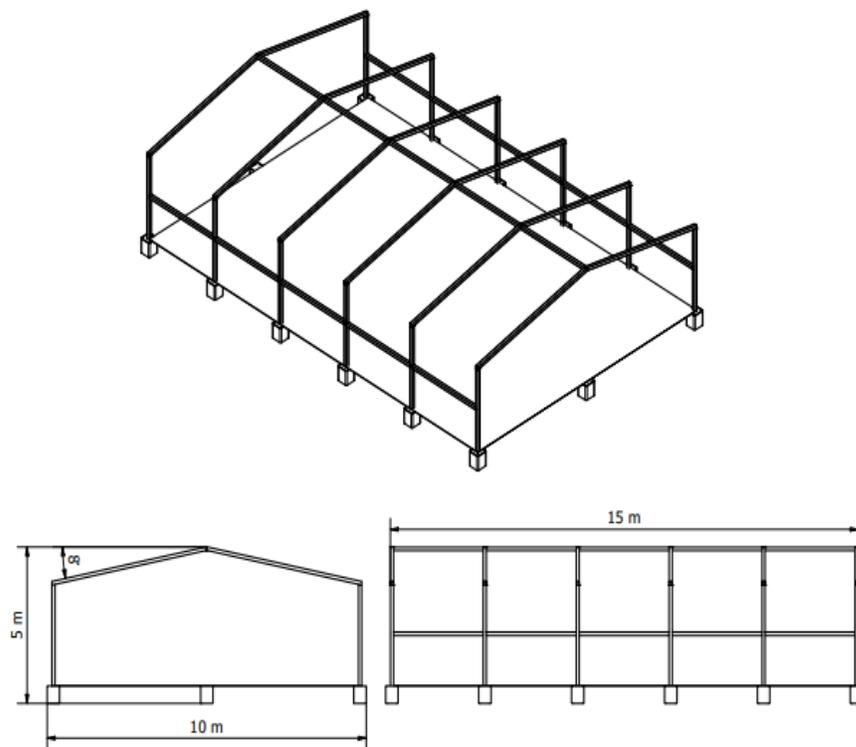


Figura 5: Dimensión del invernadero.

Fuente: Autor.

7.1.8. Dimensiones de la cámara aeropónica

Un criterio importante a tener en cuenta es el diseño modular, debido a que se puede tener una mejor apreciación de la densidad de plantas que pueden ingresar por metro cuadrado, además para el ensamble se debe optimizar los materiales y evitar su desperdicio, es por ello que, basado en medidas comerciales de planchas se ha tomado como referencia el valor de 1000 x 2000 mm (Polyfex, 2021). Además, el factor que se destaca es el espaciamiento y densidad de plantado, esto delimita un espacio de trabajo y permite el análisis adecuado de cada unidad de área disminuyendo la complejidad en el mismo, por esta razón la dimensión del módulo se ha establecido en 6000 x 1000 x 1000 mm.

La dimensión de la altura del cajón aeropónico debe depender exclusivamente de la longitud máxima de crecimiento de las raíces. Con los distintos datos recopilados se ha seleccionado la altura de 1000 mm como dimensión estándar para asegurar un buen desempeño en el crecimiento de las raíces.

Adicionalmente, otro factor a tener en cuenta es la altura del invernadero, tomando como dato anterior la altura de la cámara aeropónica más la altura que puede llegar a alcanzar la planta (1.60 m), se proporciona un espaciamiento de altura adicional para que la temperatura del invernadero sea homogénea ya que el calor del invernadero al estar recubierto por plástico traslúcido, el calor se concentra principalmente en el techo y para ello se ha estimado la altura total en la copa a 5.0 m y en las paredes laterales de 4.50 m (NOVAGRIC, 2016).

7.1.9. Dimensionamiento de las variables de control

7.1.9.1. Condiciones climáticas

Según Pumisacho y Sherwood (2002) menciona que, dependiendo de la variedad de papa, la temperatura óptima para el crecimiento de follaje normalmente se encuentra entre los 17 y 20°C, temperaturas por debajo de los 20°C retrasan la tuberización y temperaturas sobre los 30°C tienden a reducir la acumulación de materia seca. Los periodos de temperaturas altas disminuyen el follaje lo que da como resultado una disminución en el crecimiento del tubérculo. Además, menciona que para evitar la multiplicación bacteriana en el suelo, la temperatura en el suelo debe ser por lo menos de 15°C.

■ **Temperatura**

Según J. Andrade, Kromann, y Otazú (2015), menciona que en aeroponía existen tres temperaturas importantes que se deben tener en cuenta para la implementación de este método de cultivo, y son: Temperatura del invernadero, del módulo y del agua. La temperatura en el invernadero se debe mantener entre 18 y 25°C en el día y en la noche entre 8 y 15°C. El módulo aeropónico debe mantener su temperatura entre 15 y 16°C y del agua 15°C.

■ **Humedad**

En el estudio de Otazú (2010), menciona el control del flujo volumétrico de agua mediante temporizadores donde menciona dos tipos de frecuencia de riego. El primer riego en un intervalo de 10 segundos de apertura y 20 minutos de cierre, el segundo control menciona una frecuencia de 15 minutos de apertura y 15 minutos de cierre. Adicionalmente menciona que, en la noche la frecuencia de riego se puede establecer en 15 minutos de riego por cada hora.

En el artículo presentado por Farran y Mingo-Castel (2006) el experimento realizado usando aeroponía, la humedad relativa durante el periodo de estudio fue del 70% misma que menciona demostró buenos resultados.

7.2. Propuesta de diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*

7.2.1. Propuesta del diseño mecánico

Con los datos recopilados se ha procedido a la realización de tres bocetos en los que se considera principalmente la densidad de plantado y las dimensiones de la cámara aeropónica.

7.2.1.1. Primera propuesta de diseño

En esta propuesta de diseño (figura 6), el objetivo se ha centrado en abarcar una densidad de 50 plantas por metro cuadrado obteniendo el total de 600 plantas por módulo, donde las dimensiones del mismo son de 1500 mm de ancho, 1000 mm de alto y 12000 mm de largo.

En este boceto, las paredes laterales no cuentan con acceso hacia el interior de la cámara, ya que, en este el ingreso se ha optado por la parte superior. Además, se han predispuesto de tres canales de riego donde se han colocado 36 nebulizadores para garantizar la humedad a lo

largo del módulo.

La longitud del módulo coincide con la orientación del invernadero para garantizar comodidad del operario. Los callejones son de 1000 mm lo que además traduce la separación entre módulos, por otra parte también garantiza la circulación de aire entre los módulos.

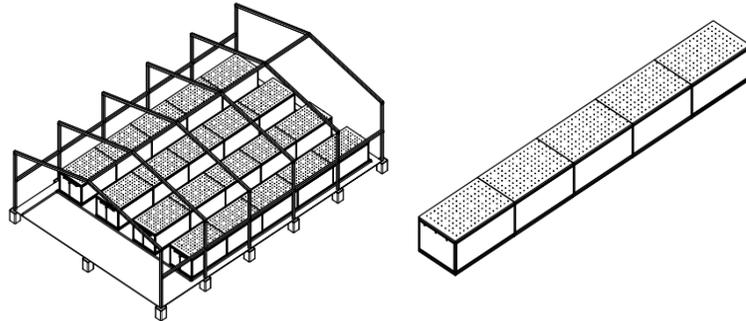


Figura 6: Primera propuesta de diseño.

Fuente: Autor.

7.2.1.2. Segunda propuesta de diseño

Para este boceto (figura 7), se ha priorizado la densidad de 40 plantas por metro cuadrado, con ello las dimensiones de módulo se han establecido en 1m de ancho, 1m de alto y 8m de largo, obteniendo así 320 plantas por módulo. La característica principal de este diseño facilita la distribución de agua hacia los módulos a la vez que se utilizan solo dos canales de distribución de agua en los módulos optimizando el riego al disponer de 20 nebulizadores para distribuir la neblina de agua homogéneamente y reduciendo los costos.

Además se ha establecido accesos hacia el interior de la cámara por ambas paredes laterales del módulo. La longitud de módulo se ha provisto para una disposición a lo ancho del invernadero abriendo un camino de acceso principal hacia los módulos y un espaciamiento entre módulos de 0.80 m que garantiza al operario una libre movilidad a lo largo del callejón.

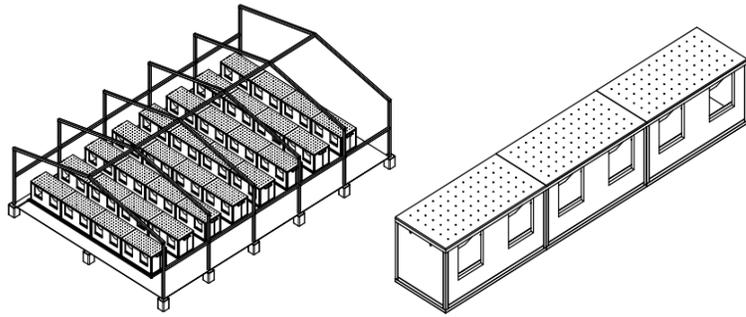


Figura 7: Segunda propuesta de diseño.

Fuente: Autor.

7.2.1.3. Tercera propuesta de diseño

En la figura 8, se ha priorizado la densidad de 30 plantas por metro cuadrado, y en base a ello las dimensiones de la cámara se han establecido en 1m de ancho, 1m de alto y 6m de largo garantizando la colocación de 180 plantas por módulo.

La característica principal de este boceto se basa en la controlabilidad del sistema, a la vez que se ha propuesto el acceso hacia el interior de la cámara mediante entradas laterales ubicadas por cada metro para garantizar el acceso hacia el interior del módulo, además que se han colocado 12 nebulizadores a lo largo en la parte superior interna mediante dos canales de distribución de agua, garantizando la humedad al interior de la cámara.

Para asegurar la libre movilidad del operario se ha optado por una distribución a lo largo del invernadero, permitiendo así también la libre circulación del aire mediante pasillos principales de 1.30 m y callejones de 0.80 m de ancho.

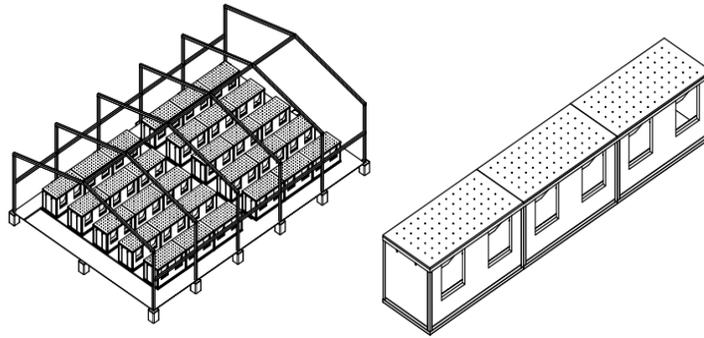


Figura 8: Tercera propuesta de diseño.

Fuente: Autor.

7.2.2. Matriz de Pugh

En la siguiente tabla 4, se ha construido una matriz de Pugh, misma que permitió seleccionar el diseño más idóneo para esta aplicación, para lo cual arrojó como diseño ganador el tercer boceto. Es importante mencionar que se consideraron diferentes parámetros según su importancia.

Tabla 4: Matriz de Pugh para bocetos propuestos.

Criterios	Ponderación	Diseños		
		Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
1. Densidad (plan/m2)	1	3	2	2
2. Ergonomía	0,6	1	3	3
3. Controlabilidad	0,9	1	2	3
4. Climatización	0,5	2	1	1
5. Dimensiones de módulo	0,9	2	3	3
6. Mantenimiento	0,7	1	2	2
7. Reducción de riesgos intrínsecos (Plagas, enfermedades, etc.)	1	1	1	3
Multiplicación por ponderación		3	2	2
		0,6	1,8	1,8
		0,9	1,8	2,7
		1	0,5	0,5
		1,8	2,7	2,7
		0,7	1,4	1,4
		1	1	3
Suma total		9,0	11,2	114,1

Fuente: Autor.

7.2.3. Selección de materiales

Con la matriz de decisión (tabla 4) identificado el boceto de mejores características y a continuación se procede a la elección de los materiales para la continuación del diseño.

7.2.3.1. Tubo estructural cuadrado

Para la selección de la estructura que respecta al módulo aeropónico, se tomó en cuenta las siguientes consideraciones: cargas estacionarias, humedad, baja mantenibilidad, ensamblado, entre otras. Como se observa en la figura 9, se optó un perfil de tipo cuadrado, en la tabla 5, se presentan algunas características más relevantes.

Según el *Manual de diseño para la construcción con acero*, este material presenta un esfuerzo de fluencia de 250MPa además de buenas características para soldadura, tenacidad frente a impactos y una elongación entre 50 y 200mm (Altos Hornos de México, 2013).

Tabla 5: Características del tubo cuadrado.

Características del material				
Material	Norma	Acabado	Ventajas	Desventajas
Tubo cuadrado 40x40x2	ASTM A36	Galvanizado	- Mantenibilidad. - Anticorrosivo. - Comercial.	- Costo. - Herramientas adicionales.

Fuente: Anexo A.

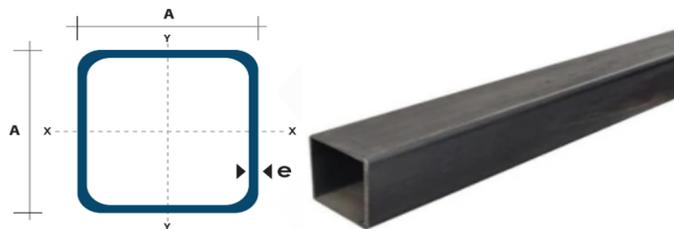


Figura 9: Perfil de tipo cuadrado.

Fuente: Anexo A.

7.2.3.2. Aislantes térmicos

Uno de los parámetros a tener en cuenta para determinar un material aislante térmico es el clima de la región en la que se va a implementar. En Cuenca la temperatura oscila según los meses del año siendo los meses de enero a mayo los más calurosos con temperaturas que oscilan entre máximos de 23 °C y mínimos de 10 °C con un promedio anual de 15 °C (METEORED, 2021).

Según los requerimientos de cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*, el clima es idóneo para su cultivo. Dentro del invernadero se considerará la temperatura estable de 20°C, dato importante para determinar la transferencia de calor de las paredes del exterior hacia el interior de la cámara. Con ello en la tabla 6 y en la figura 10 se presenta, los siguientes aislantes térmicos que serán sometidos a cálculos de permeabilidad térmica.

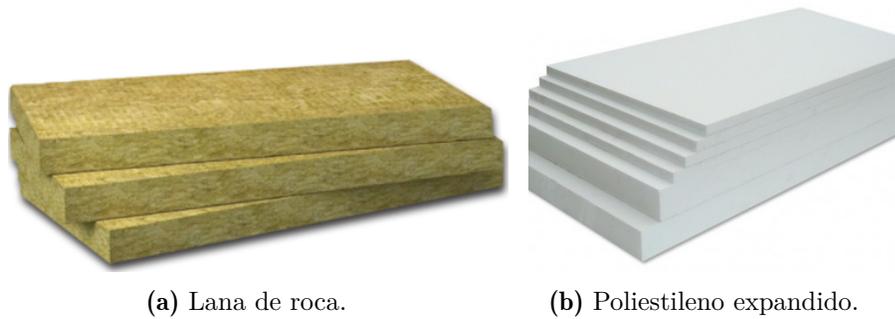
La lana de roca presenta grandes soluciones como aislamiento térmico, un sin número de aplicaciones siendo la industrial la mas frecuente, contribuye al aislamiento acustico ambiental. Gracias a su superficie lisa y algodonosa, la lana mineral de roca es fácil de manipular haciéndola suave al tacto.(Acimco, 2022)

El poliestireno expandido o eps posee características importantes que lo ubican dentro de materiales de aplicación industrial y agrícola con buenas prestaciones termoacústicas además de buena resistencia a la flexión, tracción y compresión teniendo la capacidad de absorber impactos. Por otra parte posee capacidad impedir el paso del agua gracias a su estructura celular cerrada impidiendo también la formación de mohos. (Ditevalicopor, 2017)

Tabla 6: Selección de los aislantes térmicos.

Material	Características	Ventajas	Desventajas	Impacto ambiental
Lana de roca	- Textura similar al algodón - Resistencia térmica: +500 °C	- Fácil manipulación - Alta durabilidad	- Permeable	Reciclable
Poliestileno expandido	- No resistente al fuego	- Resistencia mecánica - Resistencia biológica - Impermeable	- Producción de desechos	-Contaminante

Fuente: Autor.



(a) Lana de roca.

(b) Poliestileno expandido.

Figura 10: Aislantes térmicos.

Fuentes: Acimco (2022), Ditevalicopor (2017).

7.2.3.3. Hermetización

Para estos módulos se va a implementar un material de polietileno (tabla 7) para cerrar herméticamente el interior de estos con el fin de impedir la filtración de agua por las paredes de lana de roca.

El polietileno como producto ofrece buenas características, no es reactivo, además de ello no tóxico, sus aplicaciones van desde fabricación de tuberías a aplicaciones en agricultura, entre otros. (Repsol, 2022)

Tabla 7: Selección material hermético.

Material	Dimensiones	Característica	Impacto ambiental
Rollo de polietileno	- 4m x 75m	- Polietileno (baja densidad)	- Reciclable

Fuente: Autor.

7.2.4. Esfuerzos estructurales

Tomando valores de referencia del artículo de tesis presentado por Punina (2014), se puede establecer el dato promedio del peso por tubérculo el cual se muestra en la tabla 8. Adicionalmente teniendo en cuenta la tabla 3 y la literatura revisada se puede deducir que entre mayor es la densidad de plantas por cada metro cuadrado el rendimiento disminuye.

Los estudios realizados presentan datos de producción para mini tubérculos donde tiene una masa menor frente al artículo de Punina. Con dichos valores se han establecido 2 escenarios

con la misma densidad donde se ha tomado el valor mas alto para considerarlo como máximo esfuerzo que debe soportar la estructura.

Tabla 8: Relación de masa de tubérculo semilla y de cosecha.

Masa (kg/planta)	Densidad de plantado (Plantas /m ²)	Masa total (Kg)	Observaciones
2,81	30	84,3	Tubérculo cosecha
0,5	30	15	Tubérculo semilla

Fuente: Autor.

7.2.4.1. Peso máximo por metro cuadrado

Con la fórmula (1) se realizará el cálculo de la fuerza que se ejerce sobre la estructura.

$$F = M \cdot g \quad (1)$$

De la tabla 8 se ha obtenido la masa total en una densidad de plantado específica y con ello se procede a reemplazarlos para obtener el valor de la carga ejercida sobre la estructura.

Donde:

F = Fuerza.

M = Masa.

g = Constante de la gravedad.

$$F_{max} = 15Kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{max} = 147,15N$$

Con este valor de fuerza se puede realizar el análisis estructural del elemento seleccionado para este propósito.

7.2.4.2. Análisis estructural

En este apartado se aplican conceptos de mecánica de materiales. Para el acero seleccionado se tienen las características ya mencionadas, además a la fuerza a la que va a ser sometida, para ello, el autor Hibbeler (2011) menciona que, el Esfuerzo (σ) es el resultado de la aplicación de una carga sobre el área de la sección transversal del elemento sometido a esta, con ello se tiene la siguiente fórmula (2):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Donde:

F = Fuerza (N)

A = Área de la sección trasversal del elemento (m^2)

σ = Esfuerzo (Pa)

Mediante un software CAE especializado para análisis estructural se ha realizado el ensayo con la carga calculada en (1), aplicado sobre la cara superior de la estructura. En la figura 11a mediante el equivalente de Von-Mises, el esfuerzo ejercido sobre la estructura es de 3,42MPa. En la figura 11b. se muestra la deformación del elemento donde la misma muestra una deformación de 0,3 mm para la carga aplicada.

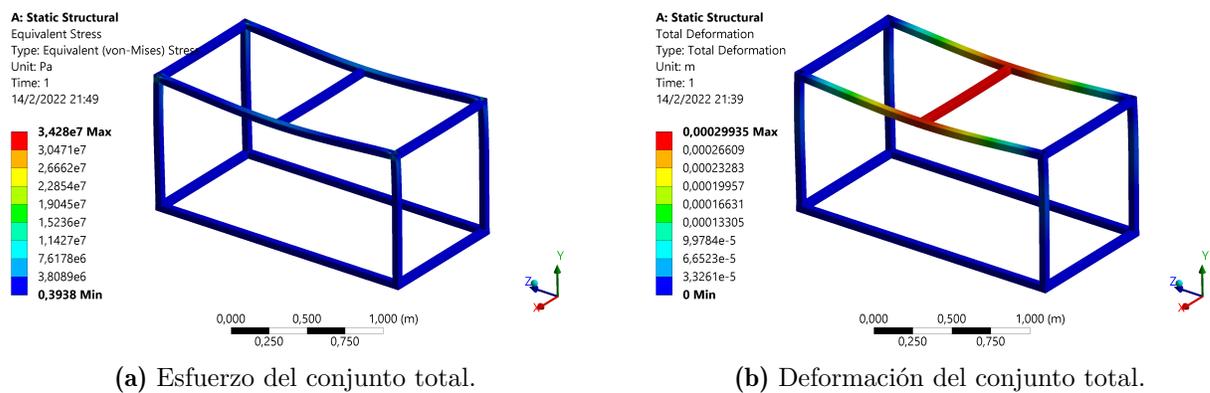


Figura 11: Esfuerzo - Deformación del análisis estructural.

El factor de seguridad es un valor adimensional que relaciona el esfuerzo último del material sobre el esfuerzo admisible (Hibbeler, 2011). Para este caso, mediante este software CAE se ha obtenido factor de seguridad de 2,514.

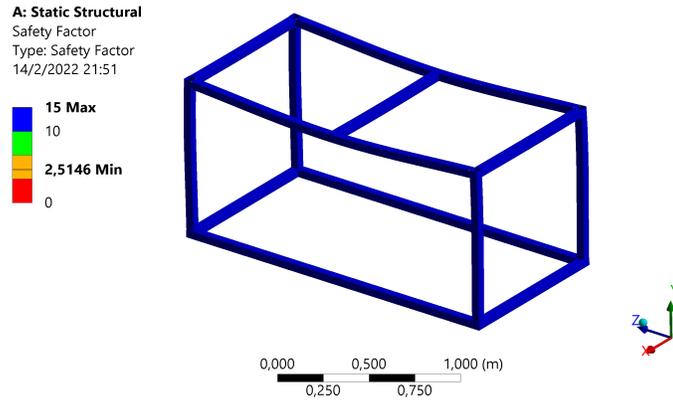


Figura 12: Perfil de tipo cuadrado.

Fuente: Anexo A.

7.2.5. Análisis térmico

▪ Ley de conducción de calor de Fourier

La ley de Fourier de la conductividad térmica establece que el flujo de la transferencia de calor se conduce a través de un elemento con conductividad térmica K es proporcional y de sentido contrario al gradiente de la temperatura en dicha dirección. Con lo mencionado se tiene la siguiente fórmula (3). (Cengel, Boles, Campos Olguín, Colli Serrano, y cols., 2003)

$$q = -\lambda \cdot \nabla T$$

$$q = -\lambda \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{e} \quad (3)$$

Donde:

q = Vector de densidad de flujo de calor local ($\frac{W}{m^2}$)

λ = Conductividad térmica del material ($\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$)

∇T = Gradiente de temperatura ($\frac{^\circ K}{m}$)

T = Temperatura ($^\circ K$)

e = Espesor del material (m)

■ Resistencia Térmica

La resistencia térmica es el recíproco de la conductividad térmica, el concepto es similar al de una resistencia eléctrica, dependiendo del material, el espesor y el área del plano se tiene la siguiente fórmula (4) (Cengel y cols., 2003).

$$R_T = \frac{e}{\lambda \cdot A} \quad (4)$$

Donde:

A = área del plano del material (m^2)

7.2.5.1. Conducción de calor de la lana de roca

En el boceto seleccionado la lana de roca se ubica en las paredes laterales y piso del cajón aeropónico, a continuación se muestra los cálculos de conducción de calor y la resistencia térmica del mismo.

■ Conducción de calor

$\lambda = 0,361 \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ K}\right)$ Conductividad térmica de la Lana de roca

$T_1 = 15(^{\circ}C) \rightarrow 288^{\circ}K$ Temperatura al interior del módulo

$T_2 = 20(^{\circ}C) \rightarrow 293^{\circ}K$ Temperatura al exterior del módulo

$e = 0,04m$ Espesor de la lana de roca

$$q = -(0,361) \cdot \frac{(288 - 293)}{0,04} = 45 \frac{W}{m^2}$$

■ Resistencia térmica

$A = 14m^2$ (área de las paredes laterales del módulo)

$$R_T = \frac{0,04}{0,361 \cdot 14} = 7,91 \cdot 10^{-3} \left(\frac{^{\circ}K}{W}\right)$$

7.2.5.2. Transferencia de calor del poliestireno expandido

En el boceto seleccionado, el poliestireno se ubica en la parte superior del cajón aeropónico siendo la tapa del módulo y donde se ubicarán las plantas, a continuación la conducción de calor y la resistencia térmica de este.

- Conducción de calor

$\lambda = 0.038(\frac{W}{m \cdot ^\circ K})$ Conductividad térmica del poliestireno

$T_1 = 15(^{\circ}C) \rightarrow 288^{\circ}K$ Temperatura al interior del módulo

$T_2 = 20(^{\circ}C) \rightarrow 293^{\circ}K$ Temperatura al exterior del módulo

$e = 0.05m$ Espesor del poliestireno

$$q = -(0,038) \cdot \frac{(288 - 293)}{0,05} = 3,8 \frac{W}{m^2}$$

- Resistencia térmica

Donde: $A = 6m^2$ (área de las pared superior del módulo)

$$R_T = \frac{0,05}{0,038 \cdot 6} = 0,22(\frac{^{\circ}K}{W})$$

7.2.6. Análisis hidráulico

- Distribución de agua

Para distribuir el agua homogéneamente entre las raíces de la planta y todo el sistema se debe garantizar el caudal y presión necesario para el trabajo de los aspersores agrícolas que van conectados hacia una red de tuberías que garanticen dicha distribución.

7.2.6.1. Aspersores

De la tabla 9, se ha seleccionado el aspersor NA-1R por las características presentadas, donde destaca su fácil instalación y mantenimiento, además de los rangos de flujo volumétrico al que puede ser sometido.

Tabla 9: Selección del Aspersor.

Producto	Método de instalación	Presión de trabajo (Bar)	Caudal de trabajo (L/h)	Alcance de riego	Mantenimiento
NA-1R	Base roscada.	2.0	12.0	- 1 m de diámetro.	- Fácil desmontaje y limpieza.
		2.5	12.7		
		3.0	13.2		
		3.5	14.5		
		4.0	15.1		
Micro Jet 360	- Base roscada	1.5	33.0	- 0.9 m a 1.1 m de diámetro.	- Fácil desmontaje. Despiece complejo.
		2.0	35.0		
Aspersor Fumigar	- Base roscada para tubería PVC	5.0	5.5	1m de diámetro.	- Fácil desmontaje. Despiece complejo.

Fuente: Autor



Figura 13: Nebulizador Agrícola Maruplast.

Disponible en: <https://maruplast.com/nebulizador/>

7.2.6.2. Tuberías

Con el nebulizador seleccionado y provisto de los datos técnicos de trabajo se procede a la selección de la tubería en la que se instalan estos elementos y para ello se ha provisto de una red principal para distribución homogénea del caudal y presión y una segunda red para riego.

▪ Proceso de diseño de tuberías internas

De los rangos de operación del nebulizador se ha establecido que el sistema trabajará con una presión de 3 bar y con flujo volumétrico de $13.2L/h$. En la figura 14, se presenta la distribución de las tuberías internas.

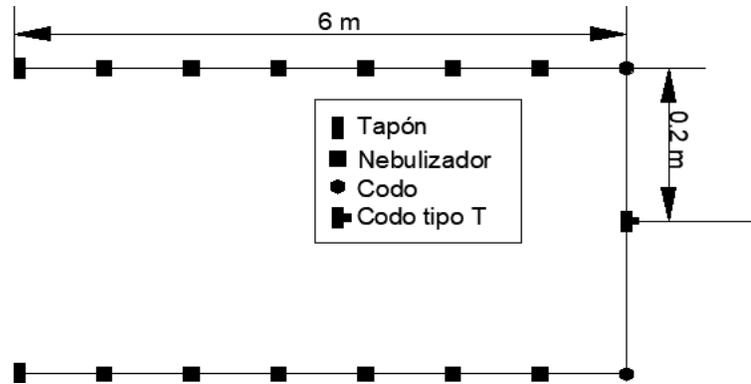


Figura 14: Diagrama de tuberías internas.

Fuente: Autor.

Inicialmente para realizar los análisis de pérdida de carga es necesario identificar los componentes que intervienen, con base en los datos recopilados por los nebulizadores se obtiene el valor inicial del caudal, importante para definir el diámetro de la tubería y posteriormente las pérdidas de carga que se dan producto de la fricción de los diversos componentes.

1) Diámetro de la tubería

Se sabe que el caudal es el resultado de la velocidad de un fluido que pasa por una sección de tubería, de ello se tiene la siguiente expresión (5).

$$q = V \cdot S \quad (5)$$

Donde:

$$q = \text{Caudal } \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

$$V = \text{Velocidad del fluido } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ Sección transversal de la tubería } (m^2)$$

$$D = \text{Diámetro } (m)$$

Despejando D se tiene la fórmula (6).

$$D = \sqrt{\frac{q \cdot 4}{\pi \cdot V}} \quad (6)$$

Del flujo volumétrico tomado del nebulizador se multiplica por la cantidad que ingresan en cada cámara aeropónica obteniendo el siguiente dato de caudal en el módulo.

Donde:

q = Caudal en el módulo ($\frac{m^3}{s}$)

q_n = Caudal del nebulizador ($\frac{L}{h}$)

n = Número de nebulizadores en el módulo

$$q = q_n \cdot n \quad (7)$$

$$q = 13,2 \cdot 12 = 158,4 \frac{L}{h}$$

Este dato se lo convierte a m^3/s obteniendo así:

$$q = 158,4 \cdot 0,27 \cdot 10^{-6} = 44 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

Adicional a ello se impone un valor entre $1m/s$ a $2,5m/s$. para el caso de estudio, en la ecuación se ha impuesto un valor de $1,5m/s$.

$$D = \sqrt{\frac{44 \cdot 10^{-6} m^3/s \cdot 4}{\pi \cdot 1,5 m/s}}$$

$$D = 6,1 \cdot 10^{-3} m$$

Diámetro de tubos PVC comerciales:

$$\phi_{int} = 16,8 \cdot 10^{-3} m$$

$$\phi_{ext} = 20 \cdot 10^{-3} m$$

Presión de trabajo = $20Bar$

Fuente: Anexo B.

Se calcula la nueva velocidad en función del nuevo diámetro:

$$V = \frac{q \cdot 4}{\pi \cdot D^4} \quad (8)$$
$$V = \frac{44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 4}{\pi \cdot (16,8 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}$$
$$V = 0,2 \text{ m/s}$$

2) Número de Reynolds

Con el número de Reynolds se determina el factor del líquido si es flujo laminar o turbulento

Donde:

$V_c = \text{Viscosidad cinemática del agua}(\text{m}^2/\text{s})$

$V = \text{Velocidad del fluido}(\text{m/s})$

$D = \text{diámetro de la tubería}(\text{m})$

$$N_{Re} = \frac{V \cdot D}{V_c} \quad (9)$$

$$N_{Re} = \frac{0,2 \text{ m/s} \cdot 16,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$N_{Re} = 2240$$

$Re < 2300 \rightarrow \text{Flujo laminar}$

3) Factor de fricción para flujo laminar

El coeficiente de fricción de Darcy - Weisbach es un factor adimensional que permite calcular las pérdidas producto de la fricción en las paredes internas del conducto por donde circula un fluido (Mott, 2006). Con el número de Reynolds se reemplaza en la siguiente ecuación (10).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

$$f = \frac{64}{2240}$$

$$f = 28,57 \cdot 10^{-3}$$

4) Pérdidas de carga en la tubería (H_{Lt})

El factor de pérdida de la tubería (H_{Lt}) se determina mediante (11)(Mott, 2006).

$$h_{Lt} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{(V)^2}{2 \cdot g} \quad (11)$$

Donde:

f = Factor de fricción calculado en (10)

L = Longitud de la tubería(m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

D = Diámetro de la tubería(m)

H_{Lt} = Pérdida de carga en la tubería(m)

$$h_{Lt} = 28,571 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{7,2 m}{16,8 \cdot 10^{-3} m} \cdot \frac{(0,2)^2}{2 \cdot 9,81}$$
$$h_{Lt} = 24,96 \cdot 10^{-3} m$$

5) Pérdidas en los codos (h_{codo})

Al igual que en la fórmula (11) Mott menciona a las diferentes uniones de tuberías, codos, tees, neplos, entre otros, como accesorios de pérdida menor y se da valores de constantes para diversos elementos donde determina la longitud del codo $L_c/D = 30$ (Anexo C).

Donde:

H_{codo} = Pérdida de carga en el codo

$$h_{codo} = f \cdot \frac{L_c}{D} \cdot \frac{(V)^2}{2 \cdot g} \quad (12)$$
$$h_{codo} = 28,571 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{30}{1} \cdot \frac{(0,2)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_{codo} = 1,747 \cdot 10^{-3} m$$

Debido a que son dos codos en el módulo se multiplica por un valor de dos obteniendo:

$$H_{codo} = 3,49 \cdot 10^{-3} m$$

6) Factor de pérdida en Tee de flujo directo(h_{TD})

Como se mencionó anteriormente, Tee es un accesorio de pérdida menor por lo que K se determina en tablas (Anexo C), teniendo en cuenta el tipo de flujo considera el valor K a continuación.

Donde:

$$h_{TD} = \text{pérdida de carga en tee directa}(m)$$

$$K = 0,1.$$

$$h_{TD} = K \cdot \frac{(V)^2}{2 \cdot g} \quad (13)$$

$$h_{TD} = 0,1 \cdot \frac{(0,2)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_{TD} = 2,03 \cdot 10^{-4} m$$

A este valor se le multiplica por 12 debido a los nebulizadores dando un valor de:

$$h_{TD} = 2,44 \cdot 10^{-3} m$$

7) Factor de pérdida en Tee de flujo bilateral(h_{TB})

Donde:

$$h_{TB} = \text{pérdida de carga en tee bilateral}(m)$$

$K = 1,8$ para flujo bilateral (Anexo C).

$$h_{TB} = k \cdot \frac{(V)^2}{2 \cdot g} \quad (14)$$

$$h_{TB} = 1,8 \cdot \frac{(0,2)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_{TB} = 2,85 \cdot 10^{-3} m$$

8) Pérdidas totales(h_T)

$$h_T = h_{Lt} + h_{codo} + h_{TB} + h_{TD} \quad (15)$$

Dando un valor total de:

$$h_T = 33,74 \cdot 10^{-3} m$$

9) Ecuación de Bernoulli

Según Mott (2006) establece que, “Cada término de la ecuación de Bernoulli es una forma de la energía que posee el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve en el sistema”. A partir de ello se muestra la ecuación (16):

$$\frac{P_a}{\gamma} + Z_a + \frac{(V_a)^2}{2 \cdot g} - h_T = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{(V_B)^2}{2 \cdot g} \quad (16)$$

Donde:

P_A = Presión en el punto A

P_B = Presión en el punto B

Z_a = Altura en el punto A

Z_b = Altura en el punto B

V_a = Velocidad en el punto A

V_b = Velocidad en el punto B

γ = Peso específico del agua a 15°C

Se despeja P_B :

$$P_B = \left(\frac{P_a}{\gamma} + \frac{(V_a)^2}{2 \cdot g} - h_T - Z_B - \frac{(V_B)^2}{2 \cdot g} \right) \cdot \gamma$$

$$P_B = \left(\frac{0,3 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{1} + \frac{(0,2 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} - 33,74 \cdot 10^{-3} \text{ m} - 1 \text{ m} - \frac{(0,2 \text{ m/s}^2)^2}{2 \cdot (9,81 \text{ m/s}^2)} \right) \cdot 9,81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$$

Dando un valor total de:

$$P_B = 299,989 \cdot 10^3 \text{ Pa} \equiv 2,9 \text{ Bar}$$

▪ **Proceso de diseño de tuberías externas**

Al igual que en el proceso para las tuberías internas, el método de diseño es el mismo para las tuberías externas.

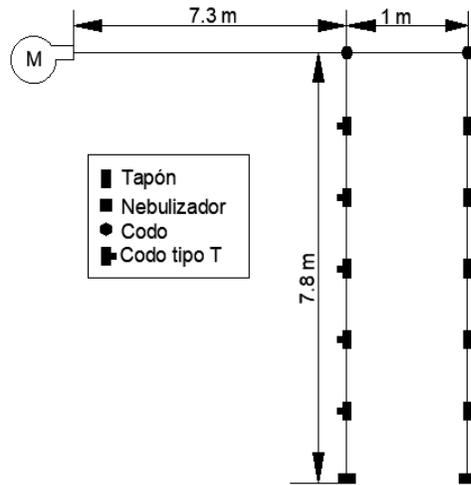


Figura 15: Distribución de tuberías externas.

Fuente: Autor.

para establecer el caudal necesario en la tubería externa se contabiliza el caudal de entrada en cada módulo obtenida en (7) multiplicado por el número de módulos a implementar.

Donde:

$n_m = 10$ número de módulos

$q_t =$ caudal total (m^3/s)

$$q_t = q \cdot n_m \tag{17}$$

$$q_t = 440 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

10) Diámetro de la tubería

Con la fórmula (6) se impone una velocidad y se calcula el diámetro de la tubería, además se ha impuesto una velocidad de $1m/s$

y se obtiene el valor

$$D = 23,7mm$$

Del anexo B se ha seleccionado el valor más cercano y se ha seleccionado la tubería a continuación.

$$\phi_{int} = 28,8 \cdot 10^{-3} m$$

$$\phi_{ext} = 32 \cdot 10^{-3} m$$

$$\text{Presión de trabajo} = 12,5Bar$$

Fuente: Anexo B.

Se calcula la nueva velocidad en función del diámetro comercial con la fórmula (8):

$$V = \frac{440 \cdot 10^{-6} m^3/s \cdot 4}{\pi \cdot (28,8 \cdot 10^{-3} m)^2}$$

$$V = 0,675 m/s$$

11) Número de Reynolds (Re)

Como se calculó el número de Reynolds con (9) nuevamente se lo realiza aquí, únicamente con diámetro diferente y se obtiene:

$$Re = 12960$$

$$Re > 4000 \rightarrow \text{Flujo turbulento}$$

12) Factor de Fricción

Como se ha mencionado que el flujo es turbulento, del libro de Mott el factor de fricción para un flujo turbulento se calcula mediante la siguiente fórmula (18).

Donde:

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro de la tubería (mm)

ϵ = Rugosidad del material(mm)

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot (D/\epsilon)} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (18)$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot (28,8/0,0015)} + \frac{5,74}{12600^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,0075$$

13) Pérdidas de carga en la tubería (H_{Lt})

El factor de pérdida de la tubería externa (H_{Lt}) se determina mediante (11).

$$h_{Lt} = 0,07 \cdot \frac{15,1 \text{ m}}{28,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \cdot \frac{(0,675)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_{Lt} = 0,91 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

14) Factor de pérdida en Tee de flujo curvo (h_{Tc})

Para este caso se usa la fórmula (14) donde únicamente cambia el factor K para flujo curvo.

Donde:

$K = 1,5$ constante para flujo curvo (Anexo C).

$$h_{Tc} = 1,5 \cdot \frac{(0,675)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_{Tc} = 0,034 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

15) Factor de pérdida en Tee de flujo directo (h_{Td})

Para este caso se usa nuevamente la fórmula (14) donde únicamente cambia el factor K para flujo directo.

Donde:

$K = 0,1$ constante para flujo directo.

$$h_{Td} = 0,1 \cdot \frac{(0,675)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_{Td} = 2,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

16) Pérdida total (H_{te})

Las pérdidas totales van a ser la suma de la pérdida en la tubería, en la tee de flujo directo y en la tee de flujo curvo donde se tiene (19).

$$H_{te} = h_{Tc} + h_{Td} + h_{Lt} \quad (19)$$

$$H_{te} = 158,32 \cdot 10^{-3} m \quad (20)$$

17) Ecuación de Bernoulli

Con los datos obtenidos se lo reemplaza en la ecuación 16.

Donde:

$$P_A = 3 \text{ Bar}$$

P_B = Presión en el punto B

$$Z_a = 0 \text{ m}$$

$$Z_b = 0 \text{ m}$$

$$V_a = 0,675 \text{ m/s}$$

$$V_b = 0,675 \text{ m/s}$$

$$y = 9,81 \text{ (KN/m}^3\text{)} \text{ peso específico del agua a } 15^\circ\text{C}$$

Se despeja P_B :

$$P_B = \left(\frac{P_a}{y} + \frac{(V_a)^2}{2 \cdot g} - h_T - \frac{(V_B)^2}{2 \cdot g} \right) \cdot y$$

$$P_B = \left(\frac{0,3 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{1} + \frac{(0,675 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} - 158,32 \cdot 10^{-3} \text{ m} - \frac{(0,675 \text{ m/s}^2)^2}{2 \cdot (9,81 \text{ m/s}^2)} \right) \cdot 9,81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$$

Dando un valor total de:

$$P_B = 299,898 \cdot 10^3 \text{ Pa} \equiv 2,9 \text{ Bar}$$

■ Potencia de la bomba hidráulica

Para el cálculo de la bomba hidráulica se necesitan dos datos, el primero el flujo volumétrico y la presión de trabajo para determinar la potencia requerida (Flores, 2010).

$$P = q \cdot \sigma \quad (21)$$

Donde:

P = Potencia (W)

q = Caudal (m^3/s)

σ = Presión del fluido (Pa)

De los parámetros de operación del nebulizador se sabe el consumo del flujo volumétrico que requiere la tubería a determinada presión se tiene:

$\sigma = 3Bar \equiv 300 \cdot 10^3 Pa$

$q = 440 \cdot 10^{-6} (m^3/s)$

$$P = 300 \cdot 10^3 \cdot 440 \cdot 10^{-6}$$

$$P = 132W \equiv 0.2Hp$$

7.3. Propuesta de diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico para cultivo de la papa Solanum Tuberosum

Para el desarrollo de este apartado se tomará en cuenta los parámetros de la sección (7.1.9), los cuales son punto de partida para determinar condiciones de control de humedad y temperatura dentro de los módulos de aeroponía.

7.3.1. Parámetros de control de temperatura y humedad

Con los datos mencionados de temperatura y humedad se ha establecido valores referenciales para solventar los requerimientos del cultivo de la papa Solanum Tuberosum. A continuación se presentan el procedimiento y los métodos para controlar estas variables.

7.3.1.1. Modelo matemático de la temperatura

Para establecer el parámetro de control de la temperatura, se ha hecho uso de la tabla psicrométrica la cual relaciona la humedad específica y temperatura para obtener la curva de la humedad relativa.

Mediante un software online se ha obtenido los distintos datos temperatura, densidad, y humedad específica considerando la altitud 2560msnm.

Introducir temperatura y altitud:

Temperatura: °C
Altitud: m

Introducir el parámetro conocido:

- Temperatura Bulbo Húmedo
 Humedad Relativa

Valor:

Diagrama psicrométrico interactivo:

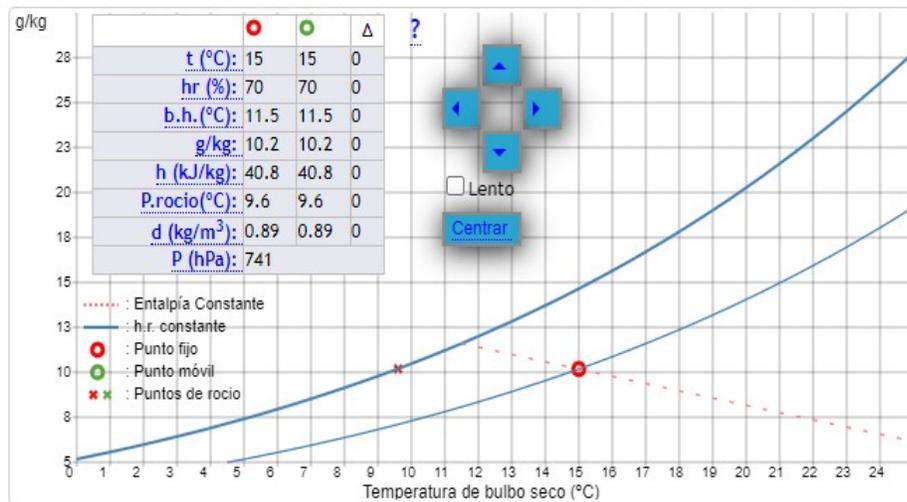


Figura 16: tabla psicrométrica Online

Disponible en: <https://www.herramientasingenieria.com/>

Como los datos extraídos presentan una tendencia no lineal, mediante software de Excel se han linearizado en función de los rangos de operación definidos, y de ello se han obtenido dos ecuaciones, (22) que relaciona Temperatura en función de la humedad específica y (23) que relaciona la humedad específica en función de la densidad.

■ **Ecuación Temperatura - Humedad específica**

Mediante el software se han muestreado distintos valores de temperatura sin modificar la humedad relativa obteniendo de ello la humedad específica en gramos de agua sobre kilogramos de aire, la tabla 10 muestra los datos recopilados y la figura 17 la linearización de la curva de dond .

Tabla 10: Valores de Temperatura vs Humedad Específica.

Temperatura °C	Humedad Específica gH2O/KgO2
10	7,3
12,5	8,6
15	10,2
17,5	12
20	14,1
23	17
25	19,2
27	21,7
30	26

Fuente: Autor.

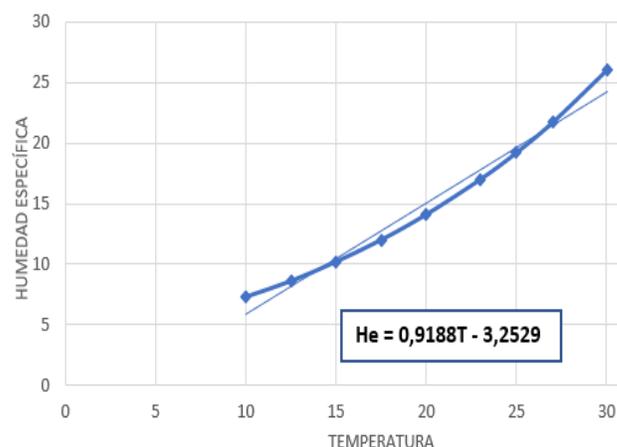


Figura 17: Temperatura vs Humedad específica.

Fuente: Autor.

$$T = \frac{H_e + 3.25}{0.9188} \quad (22)$$

Donde :

$T = Temperatura(^{\circ}C)$

$H_e = Humedad\ específica\ (g/Kg)$

■ Ecuación Humedad específica - Densidad

Con el mismo método usado para la obtención de la ecuación (22) se ha tabulado los datos de la humedad específica en los rangos de temperatura de la tabla 10 y se ha obtenido los datos de densidad para cada humedad específica mostrada en la tabla 11 y de la misma manera se ha linearizado como se muestra en la figura 18 obteniéndose la ecuación (23).

Tabla 11: Valores de Humedad Específica vs Densidad.

Humedad Específica gH2O/KgO2	Densidad m3/kg
7,3	0,91
8,6	0,9
10,2	0,89
12	0,88
14,1	0,87
17	0,86

Fuente: Autor.

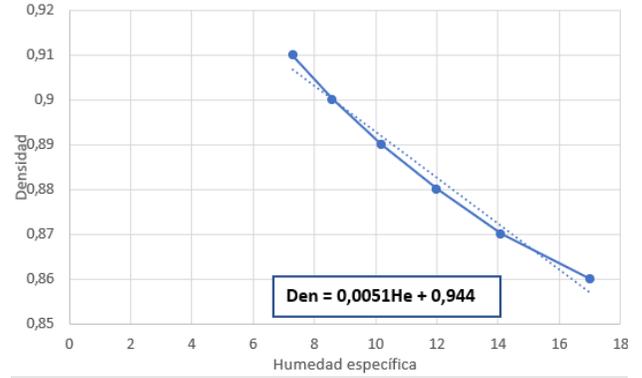


Figura 18: Humedad específica vs Densidad.

Fuente: Autor.

$$H_e = \frac{-\rho + 0.9443}{0.051} \quad (23)$$

Donde :

$$\rho = \text{densidad}(Kg/m^3)$$

Para relacionar el flujo volumétrico que ingresa al sistema se tiene en cuenta la ecuación de la densidad (24) y la de caudal (25).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (24)$$

Donde :

$$M = \text{Masa}(Kg)$$

$$V = \text{Volumen}(m^3)$$

$$q = \frac{V}{t} \quad (25)$$

Donde :

$$q = \text{caudal}$$

$$t = \text{tiempo}(s)$$

De la ecuación de (25) se despeja V y se reemplaza en la ecuación (24).

$$\rho = \frac{M}{q \cdot t} \quad (26)$$

■ Ecuación obtenida de la Temperatura en función - tiempo

Con las ecuaciones (26) se reemplaza en (23) y a su vez esta se sustituye en (22) obteniendo la ecuación que describe la variación de la Temperatura en función del tiempo (27).

$$T = -\frac{0.88}{0.0047 \cdot t} + 834.04 \quad (27)$$

■ Interpretación de la ecuación de la Temperatura - tiempo

Como se ha mencionado anteriormente tanto la ecuación de (22) y (23) son ecuaciones que se relacionan. Si varía la temperatura se explica que varió la humedad específica. La variación de la humedad específica es el resultado de la variación de la densidad de aire húmedo en el sistema; es por ello que la variación de densidad depende del caudal ingresado en determinado tiempo, conocido el caudal, el tiempo estimará la entrada de agua al sistema hasta estabilizar la temperatura.

7.3.2. Propuesta de control de temperatura y humedad

En función de los parámetros del cultivo, se requiere ejecutar un proceso automatizado que permita controlar estas variables, para lograrlo se pueden dar distintos métodos, los cuales se deben integrar a la cámara aeropónica diseñada en la sección (7.2.2), haciendo de este un sistema mecatrónico. Con lo mencionado se presentan a continuación dos propuestas de control de automatización de humedad y temperatura.

7.3.2.1. Propuesta de automatización 1

Para esta propuesta de automatización de este sistema se ha pensado en controlar individualmente la humedad y la temperatura en cada módulo y se ha propuesto el control de estas variables mediante la integración de tres elementos que son:

- Caudal

- Calefacción
- Ventilación

En donde, el caudal controlará la humedad del sistema mediante la activación y desactivación de electroválvulas, la ventilación el exceso de humedad y el sistema de calefacción controlará la temperatura, cabe recalcar que el método de calefacción funcionará en conjunto con la ventilación para ingresar aire caliente al interior del módulo desde el exterior.

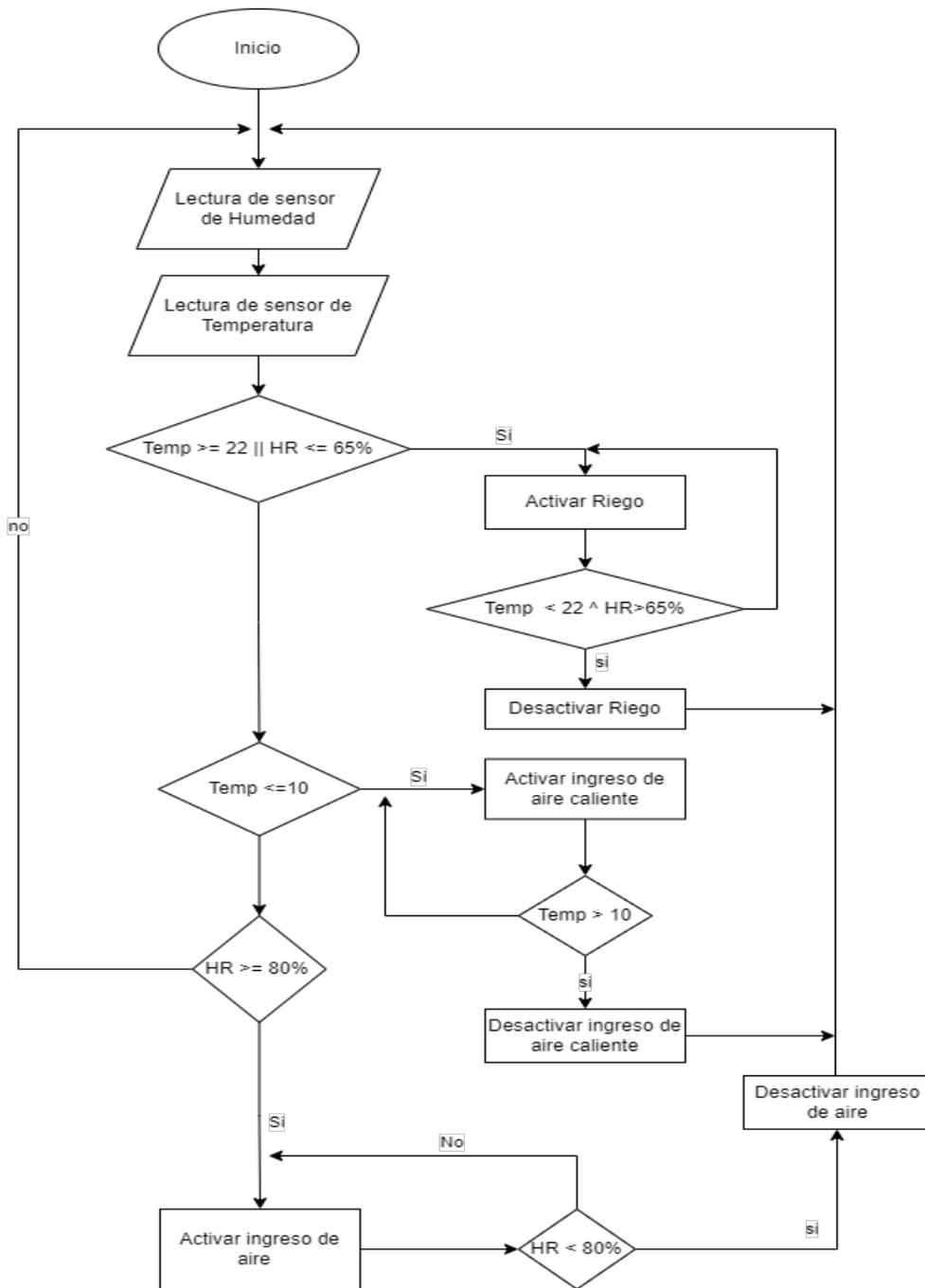


Figura 19: Diagrama de flujo de control de humedad y temperatura propuesta 1.

Fuente: Autor.

7.3.2.2. Propuesta de Automatización 2

En este método, la automatización del sistema se basa en el control individual de la humedad en el módulo y el control general de la temperatura mediante la intervención de dos elementos que son:

- Caudal
- Intercambiador de calor

La humedad se controlará individualmente en cada módulo de aeroponía mediante la activación o desactivación de electroválvulas. Por otra parte el control de la temperatura se lo hará de manera general mediante la variación de la temperatura del agua a través de un chiller (intercambiador de calor) que distribuirá y estabilizará la temperatura en todos los módulos.

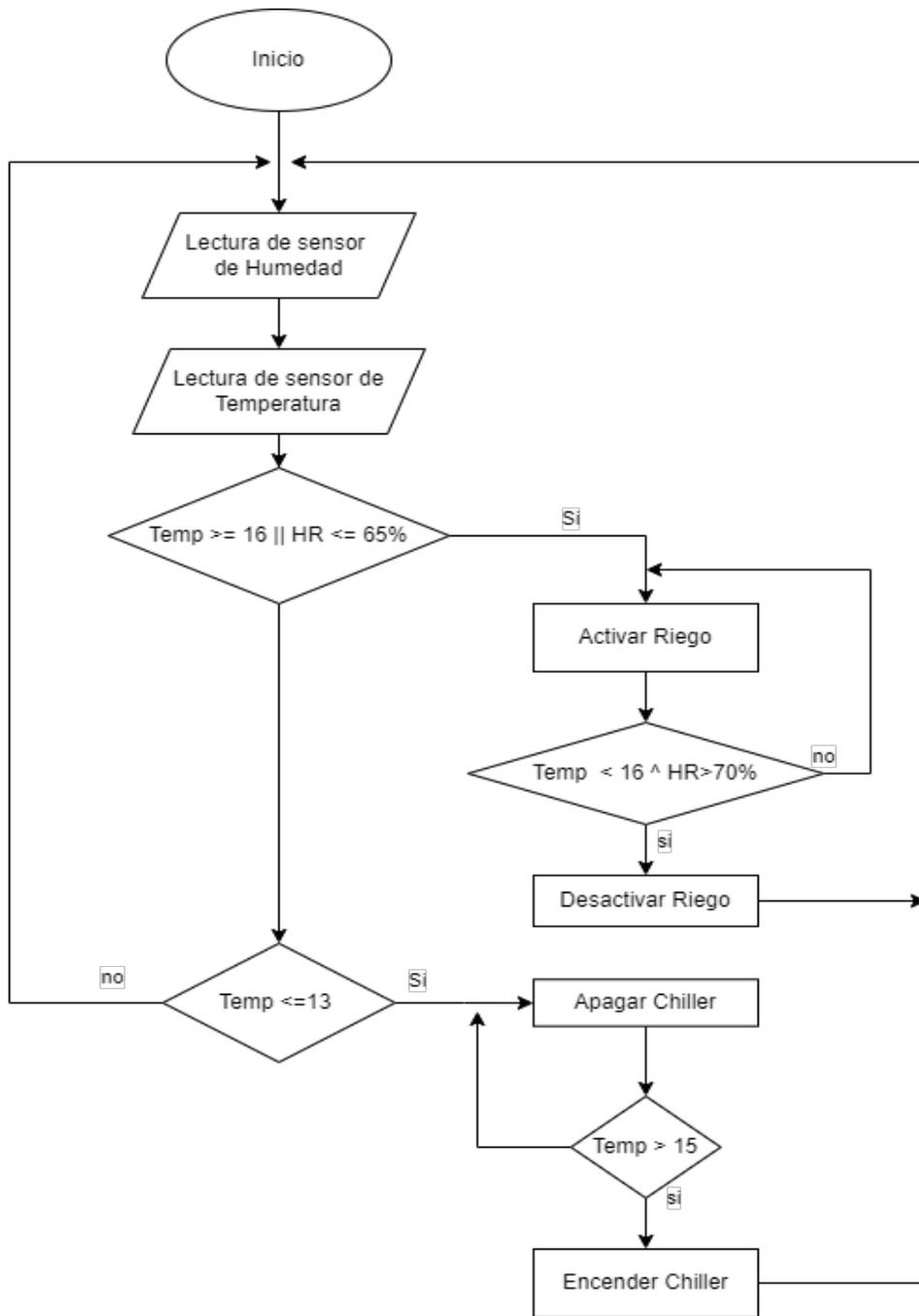


Figura 20: Diagrama de flujo de control de humedad y temperatura propuesta 2.

Fuente: Autor.

7.3.3. Matriz de Pugh

Con el mismo método de la sección (7.2.2), con la matriz de Pugh se ha hecho un análisis para seleccionar la mejor propuesta de diseño de control de las variables objetivo de esta sección.

Tabla 12: Matriz de Pugh para propuestas de control.

Criterios	Diseños		
	Ponderación	Propuesta 1	Propuesta 2
1. Controlabilidad de humedad	0,7	3	3
2. Controlabilidad de temperatura	1	1	3
3. Elementos	0,6	1	2
4. Control bacteriano	1	1	3
5. Recurso energético	0,7	1	2
6. Mantenibilidad	0,9	2	3
7. Fiabilidad del sistema	1	1	3
Multiplicación por ponderación		2,1	2,1
		1	3
		0,6	1,2
		1	3
		0,7	1,4
		1,8	2,7
		1	3
Suma total		8,2	16,4

Fuente: Autor.

De los esquemas presentados ha resultado ganador el segundo esquema de automatización especialmente por tres aspectos importantes: la controlabilidad de la temperatura, control bacteriano y fiabilidad del sistema. Ya que este control asegura una temperatura estable y baja para que no exista propagación bacteriana y así evitar la aparición de plagas al interior del módulo. Además el sistema se hace mas fiable al conocer que la temperatura que ingresa en cada módulo es homogénea gracias al control térmico del agua lo que garantiza la misma temperatura en todos los módulos.

7.3.4. Selección de componentes

Una vez definido el método de control, el siguiente paso para este diseño es seleccionar los elementos que intervienen para medición de parámetros, controladores y actuadores. A continuación se presentan los elementos de intervención del mismo.

7.3.4.1. Controladores

Del modelo matemático obtenido, si bien se puede realizar un controlador para la automatización de las variables de humedad y temperatura, en el mercado existen equipos que permiten controlar estas variables, y se ha optado por esta segunda opción, ya que en etapa de diseño para el controlador que se obtenga a partir de la ecuación (27) requerirá de ensayos y simulaciones para demostrar su fiabilidad y cada ensayo puede tardar lo que tarda el ciclo de cultivo de la papa, sin embargo no se descarta ya que a partir de ahí se puede personalizar al controlador incluyendo mas variables al sistema. A continuación se presenta tres modelos de controladores.

Tabla 13: Características de los controladores.

Modelo	Características	Rango de operación	Costo
- MT-530e Super	- Alimentación - Temperatura de control - Humedad de control - Sensor	12,24,115,220 Vac/dc -10 a 70.0 °C $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ (Resolución 0,1°C) 10 a 85%HR $\pm 5\%$ HR (Resolución 0,1 %HR) DHT11	\$100
- AHC-80 Plus	- Alimentación - Temperatura de control - Humedad de control - Sensor	115/220 Vac -5.0 hasta 50.0°C (Resolución $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) 40 hasta 100%HR (Resolución $\pm 1\%$ HR) Sensor psicrométrico de bulbo humedo y seco	\$335
- N323RHT	- Alimentación - Temperatura de control - Humedad de control - Sensor	12, 24 Vac/dc 0 a 100%HR (Resolución 1%HR) -20°a 100°C (Resolución0,1°C) RHT	\$205

Fuente: Autor.

De los tres modelos de controladores se ha optado por el controlador MT-530e Super.

▪ **Controlador MT-530e Super**

Como se ha podido observar en la tabla 13, quienes presentan buenas características de medición de parámetros con un amplio rango medición y error muy bajo son los modelos AHC-80 Plus y N322RHT, sin embargo los requerimientos de control no exigen esto, por lo que las ventajas del controlador MT-530e Super como son: precio, alimentación y resolución de los parámetros de medición que lo hacen el controlador ganador, si bien la temperatura tener un error de un grado, los parámetros del controlador pueden ajustarse para controlar este rango de error estableciendo un mínimo y un máximo de temperatura. En cuanto a la HR, el sistema puede aceptar este rango de error ya no es crítico mantener la humedad en el 70%.



Figura 21: Controlador Marca Full Gauge modelo MT-530e Super

Fuente: Anexo D.

▪ **Diagrama de bloques del controlador**

El controlador posee un sensor que permite la medición de parámetros de humedad y temperatura, en función de la referencia programada activará dos elementos principales que son: dos salidas de control on-off para caudal y temperatura y una tercera salida de control on-off para un auxiliar en caso de requerirlo.

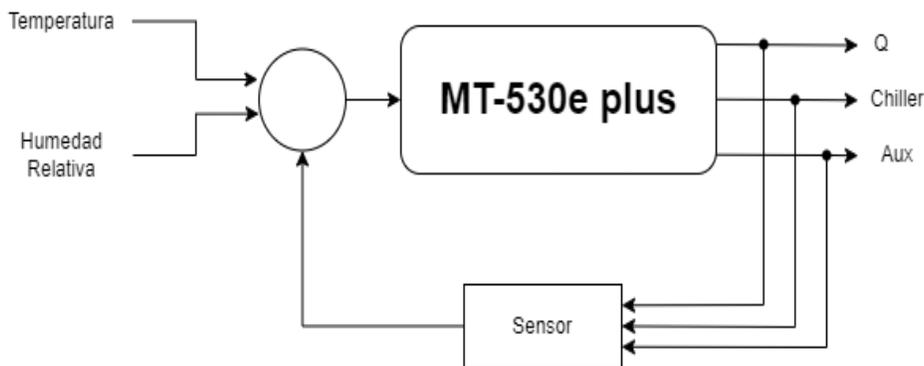


Figura 22: diagrama de bloque del controlador

7.2.6.2. Electroválvulas

Para la operación de control desde el MT-530 que activa el paso de corriente, se requiere una electroválvula normalmente cerrada para la apertura una vez que este el controlador active la salida de caudal. Con base en esto se ha seleccionado el controlador con trabajo a 12V se ha optado por el controlador Baomain.

Tabla 14: Características de la electroválvula

Modelo	Producto	Características
Baomain	- Material:	Cobre
	- Voltaje:	12Vdc
	- Conexiones:	Rosca hembra 3/4"
	- Estado:	NC
	- Presión de trabajo:	hasta 10 Bar



Figura 23: Electroválvula Baomain

Disponible en: <https://www.amazon.com/>

7.2.6.3. Enfriadores de agua

Para controlar la temperatura del agua se ha seleccionado el siguiente chiller que posee las características de flujo volumétrico y presión requeridos de trabajo.

Tabla 15: Características del CF800

Características	Operación
Caudal	1320L/h
Enfriamiento	Temp. ambiente hasta 0°C
Voltaje	115Vac



Figura 24: Chiller CF800

Fuente: Anexo E.

7.2.6.4. Bombas centrífugas

Como se analizó los datos requeridos en el cálculo de las tuberías se requiere una bomba centrífuga con potencia de 135W (0.2Hp), dado que a método de sobredimensionar y

comercialmente están mas disponibles las bombas centrífugas de 0.5Hp, el cual puede ajustarse a los requerimientos del sistema con una válvula de presión. A continuación se muestra la bomba hidráulica seleccionada.

Tabla 16: Características de la bomba hidráulica

Características de operación	
Modelo:	APM37
Potencia:	0,5Hp(370W)
Voltaje:	110/220Vac
Conexiones:	Rosca hembra 1"
Flujo:	2400L/h



Figura 25: Bomba hidráulica Leo

Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.ec/>

7.3.5. Esquema eléctrico del diseño de control

Con los elementos seleccionados, se presenta el fragmento de conexiones del sistema eléctrico y de control del sistema.

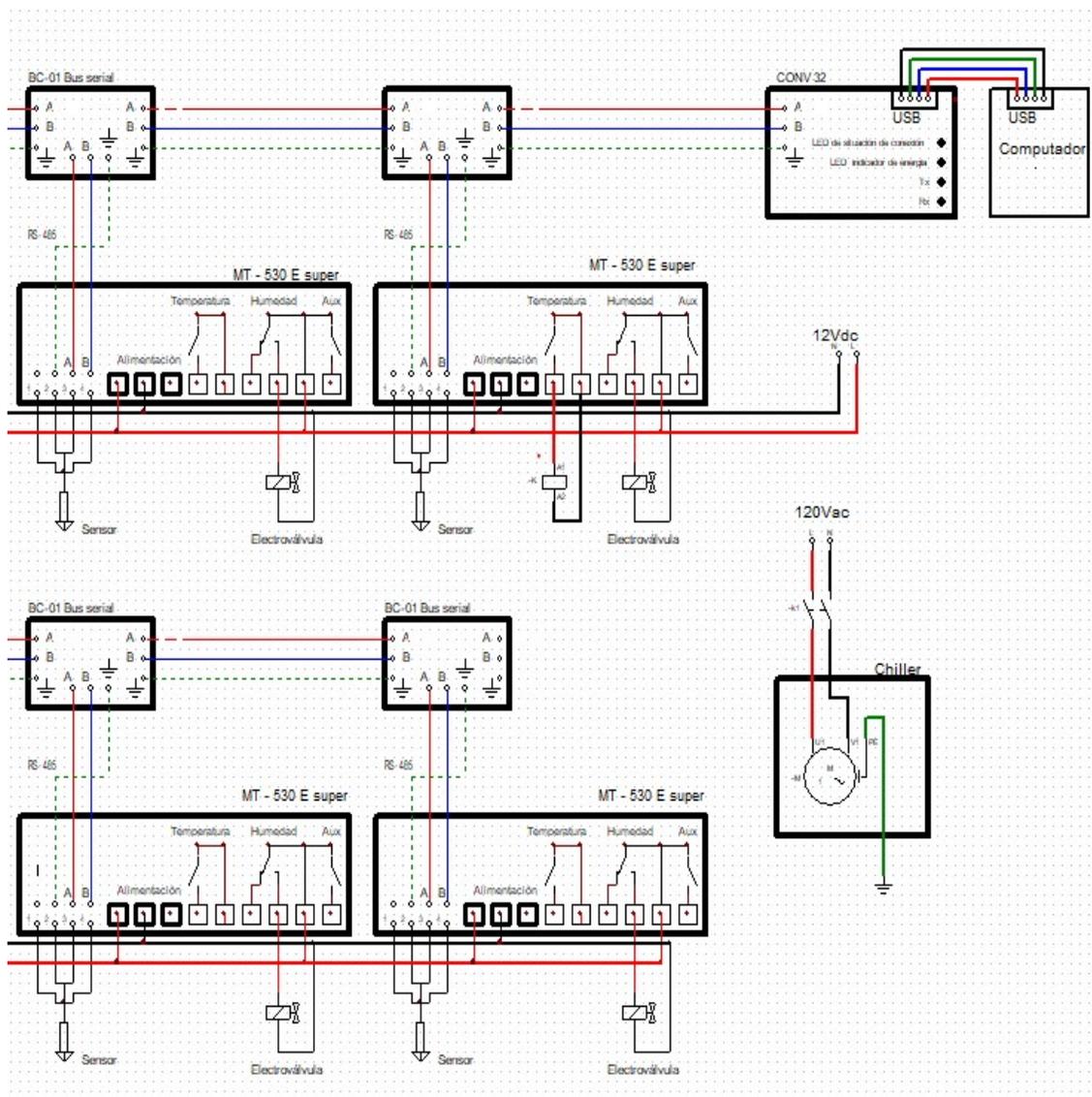


Figura 26: Diagrama de conexiones eléctricas

Fuente: Autor.

7.3.6. Propuesta final

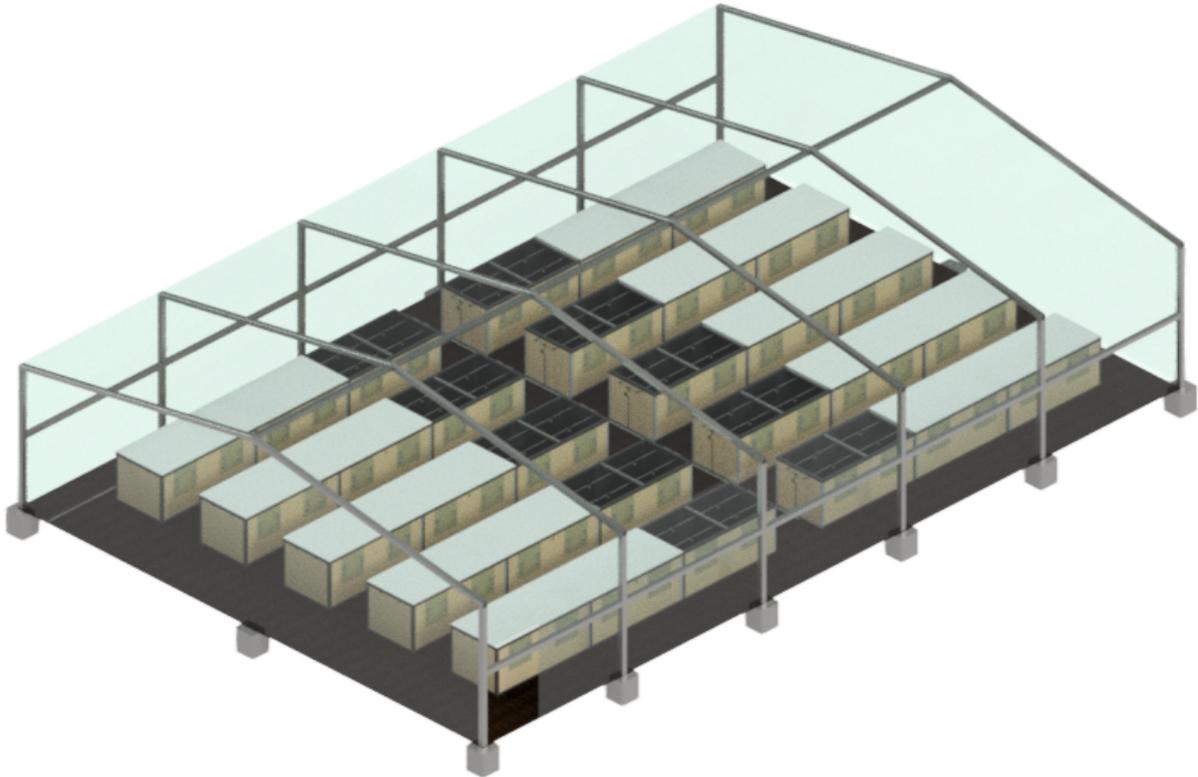


Figura 27: Diseño del invernadero implementado

Fuente: Autor.

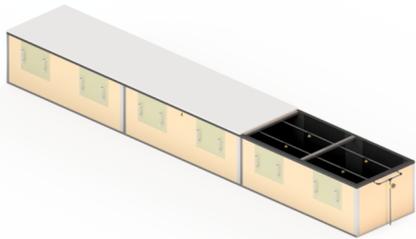


Figura 28: Diseño de la cámara aeropónica



Figura 29: Diseño de la cámara aeropónica (acercamiento)

Fuente: Autor.

7.4. Análisis del costo de implementación para un huerto aeropónico automatizado en el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*

En esta sección se expone los costos de implementación del huerto aeropónico en donde intervienen costos de materias primas necesarios para la construcción del huerto, adicional a ello se pone a consideración costos de mano de obra entre otros para aproximar un alcance real de las amenazas y oportunidades de su implementación mediante un análisis de de sensibilidad.

7.4.1. Costos de insumos

En la tabla 17 se muestra el costo de la materia prima y demás elementos correspondientes a la construcción del huerto aeropónico con los materiales seleccionados en las secciones anteriores.

Tabla 17: Materia prima e insumos.

INSUMOS					
Nº	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Uno	Total
1	Tubo cuadrado - 6metros (ASTM A36)	32	u	\$ 22,30	\$ 713,60
2	Nebulizador (NA-R1)	120	u	\$ 1,20	\$ 144,00
3	Lana de roca (1200x600x40mm)	435	u	\$ 15,45	\$ 6.720,75
4	Espuma Flex (1000x2000x50mm)	30	u	\$ 18,00	\$ 540,00
5	Plastico negro (4000x75000x0.2mm)	1	u	\$ 79,00	\$ 79,00
6	Tuberia PVC - 6 metros (3/4 pulgada)	30	u	\$ 6,89	\$ 206,70
7	Bomba Centrífuga	1	u	\$ 60,00	\$ 60,00
8	Tanque 2500 litros	1	u	\$ 280,00	\$ 280,00
9	Controlador temperatura/ Humedad/ sondas 115/220v / MT-530E SUPER	10	u	\$ 80,00	\$ 800,00
10	Codos 90º PVC (3/4 pulgada)	20	u	\$ 0,45	\$ 9,00
11	Codos tipo T PVC (3/4 pulgada)	10	u	\$ 0,62	\$ 6,20
12	Codos tipo T reductora PVC	10	u	\$ 3,45	\$ 34,50
13	Suelda Alambre Mig 0.9mm 5 kg	1	kg	\$ 17,83	\$ 17,83
14	Convertidor de datos USB (RS-485)	1	u	\$ 52,00	\$ 52,00

15	Electroválvula Válvula 3/4 Pulgada Solenoide Riego Agua	10	u	\$ 36,73	\$ 367,30
16	Sistema eléctrico (Cableado, cabina,etc.)	1	u	\$ 120,00	\$ 120,00
17	Manómetro de 0 a 1000 PSI	1	u	\$ 38,00	\$ 38,00
18	Válvula uniflujo (check) de 1"1/4	1	u	\$ 23,54	\$ 23,54
	Chiller	1	u	\$ 600,00	\$ 600,00
19	Llave de paso 1"1/4	4	u	\$ 45,00	\$ 180,00
20	Varios (Teflón, Pega tubo, etc.)	1	u	\$ 50,00	\$ 50,00
Suma total:					\$11.042,42

Fuente: Autor.

7.4.2. Costos de mano de obra técnica

Otro costo a considerar dentro de éste análisis son los de mano de obra técnica donde la contratación se da por servicios prestados que incluyen albañilería, plomería e instalaciones eléctricas, esto se lo ha hecho a estimación de un mes de trabajo con la contratación total de 4 obreros, tres en construcción y uno en instalaciones eléctricas y programación, en la tabla 18 a continuación se muestran los rubros estimados.

Tabla 18: Costo de mano de obra técnica.

COSTO DE MANO DE OBRA TÉCNICA	
Denominación	Valor
PROCESOS (Equipos + Mano de obra)	
Construcción de la estructura y colocación de elementos	\$ 1075.00
Instalación del sistema eléctrico-electrónico	\$ 100.00
Programación del sistema	\$ 100.00
TOTAL:	\$ 1275.00

Fuente: Autor.

7.4.3. Costos indirectos

En la tabla 19 se muestran costos de indirectos de implementación considerados a un año como recomienda Chan (2009), donde se incluyen costos de servicios básicos, software, viáticos, entre otros.

Tabla 19: Costos indirectos del sistema propuesto.

COSTOS INDIRECTOS DEL SISTEMA PROPUESTO			
Denominación	Cantidad	Costo Unitario	Costo
Internet	12	30	\$ 360.00
Software de diseño	6	275	\$ 1095.00
Software de simulación	6	80	\$ 480.00
Transporte	125	0,30	\$ 90.00
Alimentación	180	2,25	\$ 405.00
Servicios básicos	6	20	\$ 120.00
Varios	1	100	\$ 100.00
TOTAL:			\$2650.00

Fuente: Autor.

7.4.4. Costo neto de implementación

En esta sección se realiza la suma de los valores totales por rubros de: insumos, costos directos e indirectos. En la tabla 20, a continuación se muestra el precio neto de la implementación, cabe mencionar que, el costo de los imprevistos se ha extraído de los costos directos e indirectos que serán los que fluctuarán por el mercado, transporte u otros egresos, por otra parte, los rubros de reingeniería son servicios prestados de valor fijo.

Tabla 20: Costo total de implementación.

COSTO TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN	
Denominación	Costo Total
Costos directos (Insumos, costo de mano de obra técnica)	\$ 12.317,42
Indirectos	\$ 2.560,00
Reingeniería (Servicios prestados)	\$ 3.840,00
Imprevistos (5%)	\$ 1.127,87
TOTAL:	\$ 19.845,29

Fuente: Autor.

7.4.5. Análisis de Sensibilidad Escenario 1

El análisis de sensibilidad es un método para estimar el capital de riesgo dentro de un proyecto donde se efectúa la pregunta del “que pasaría si” sube o baja el precio del producto, la demanda u otro elemento y con ello se estima cuando existirán pérdidas o ganancias en el ciclo de vida de un proyecto, cabe recalcar que para éste análisis se ha considerado a cinco años la finalización del proyecto como lo recomienda Chan (2009).

A continuación en la tabla 21 se procede inicialmente a establecer escenarios probables de producción de papas para la cantidad de plantas y módulos implementados.

Para este escenario se ha establecido la inversión calculada en la tabla 20 y el costo de servicios básicos, intereses, depreciación y otros rubros del invernadero se calculan a partir del primer año de producción.

Tabla 21: Rendimiento Probable.

Módulos	Longitud del módulo	Plantas/m2	masa (kg)	Producción total (Kg)
5	6	30	2,81	75,87
7	6	30	2,81	106,218
10	6	30	2,81	151,74

Fuente: Autor.

7.4.5.1. Datos de entrada

Estos valores son extraídos de la tabla 21, para este caso se ha seleccionado el mejor de los escenarios y a partir de estos datos se realiza el análisis de sensibilidad.

El costo fijo se ha estimado a partir de rubros de servicios básicos (consumo eléctrico), para la tasa de impuestos se ha tomado en cuenta la legislación actual del Ecuador, en este caso el proyecto se lo ha considerado como micro empresa y la tasa de impuestos es del 0%; por otra parte, el valor de la TREMA se ha considerado con la prima de riesgo país actual mas la inflación (Chan, 2009).

Tabla 22: Escenario exitoso de costos.

Datos de entrada (base)	Análisis de sensibilidad
Precio unitario	52,00
Demanda	152
Tasa de crecimiento	8 %
costo variable (\$unidad)	40,56
Costo de operación (costo fijo)	9373
Rescate	8248,00
Tasa de impuestos	0 %
TREMA	9,42 %

Fuente: Autor.

7.4.5.2. Ingresos

Una vez establecidos los escenarios probables de producción, se analizará los ingresos generados de esta actividad y en la tabla 23 para el caso de toda su capacidad operativa (10 módulos). Adicionalmente, la tasa de crecimiento ha sido tomado de porcentajes recomendados por Chan (2009) y se visualiza como crece la demanda anual en función de esta.

Tabla 23: Ingresos.

Estado de ingresos (AÑOS)	0	1	2	3	4	5
Precio unitario		52,00	52,00	52,00	52,00	52,00
Demanda (quintales)		150,00	162,00	174,96	188,96	204,07
Ingresos por venta		7800,00	8424,00	9097,92	9825,75	10611,81

Fuente: Autor.

7.4.5.3. Estado de gastos

En la tabla 24 se visualiza el ingreso neto como ganancia actual posterior a los egresos por depreciación, costos fijos de operación y otros gastos.

Tabla 24: Estado de gastos.

Estado de gastos (AÑOS)	0	1	2	3	4	5
Costo unitario Variable		41,00	41,00	41,00	41,00	41,00
Costo variable		1650,00	1782,00	1924,56	2078,52	2244,81
Costo de operación		9373,00	9373,00	9373,00	9373,00	9373,00
Depreciación		992,26	793,81	595,36	396,91	198,45
Ingreso gravable		-4215,26	-3524,81	-2795,00	-2022,68	-1204,45
Impuesto sobre la renta (40%)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ingreso neto		-4215,26	-3524,81	-2795,00	-2022,68	-1204,45

Fuente: Autor.

7.4.5.4. Estado de flujos de efectivo

En la tabla 25 se muestra el flujo de efectivo anual calculado en base a la de inversión y los ingresos e gastos generados. Partiendo del flujo de efectivo generado se calcula la tasa interna de retorno (TIR) el cual es un porcentaje de muestra a la rentabilidad de la inversión en un proyecto, así como también el valor presente neto (VPN) o ganancias esperadas a final del ciclo de vida del proyecto (Chan, 2009).

Tabla 25: Estado de flujos de efectivo.

Actividades operativas	0	1	2	3	4	5
Ingreso neto		-4215,26	-3524,81	-2795,00	-2022,68	-1204,45
depreciación		992,26	793,81	595,36	396,91	198,45
Actividades de inversión:						
Inversión	-19845,29					
Rescate						8242,00
Impuesto sobre ganancias						0,00
Flujo de efectivo neto	-19845,29	-3223,00	-2731,00	-2199,64	-1625,77	7236,01
					TIR	-30%
					VPN	\$-23.271,69

Fuente: Autor.

7.4.5.5. Análisis de Sensibilidad (Escenario 1)

En este apartado se ha calculado el “que pasaría si” las distintas variables varían entre del -20% al +20% de su valor actual tomando estos parámetros de la literatura citada en esta sección, en la tabla 26 se muestra la fluctuación del VPN en función de las distintas variables que intervienen en el análisis de Sensibilidad.

Tabla 26: Análisis de Sensibilidad fluctuante de -20% a 20%

Desviación	-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
Precio unitario	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69
Demanda	-28748,24	-27379,10	-26009,97	-24640,83	-23271,69	-21902,56	-20533,42	-19164,29	-17795,15
Tasa de crecimiento	-24060,74	-23865,66	-23669,13	-23471,14	-23271,69	-23070,77	-22868,37	-22664,47	-22459,08
Costo unitario variable	-28748,24	-27379,10	-26009,97	-24640,83	-23271,69	-21902,56	-20533,42	-19164,29	-17795,15
costo de operación	-16058,93	-17862,12	-19665,31	-21468,50	-23271,69	-25074,89	-26878,08	-28681,27	-30484,46
valor de rescate	-24322,64	-24059,90	-23797,17	-23534,43	-23271,69	-23008,96	-22746,22	-22483,49	-22220,75

Fuente: Autor.

7.4.6. Análisis de Sensibilidad Escenario 2

En este escenario se ha supuesto un rubro adicional por implementación de paneles solares como método alternativo de suplir a los servicios básicos, el cual se ha asumido en un total de diez mil dólares de inversión adicional para suplir el costo de operación, en Helios estrategia Ecuador (2019) en su catálogo de paneles solares se ha seleccionado el modelo TSM-DE09.08 (anexo F) y como servicio externo que se suman a la tabla 20 obteniendo un nuevo costo de implementación mostrada a continuación en la tabla 27.

Tabla 27: Costo total de implementación 2.

COSTO TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN	
Denominación	Costo Total
Costos directos (Insumos, costo de mano de obra técnica)	\$ 12.317,42
Indirectos	\$ 2.560,00
Reingeniería (Servicios prestados)	\$ 3.840,00
Imprevistos (5%)	\$ 1.127,87
Paneles Solares	\$ 10.000,00
TOTAL:	\$ 29.845,29

Fuente: Autor.

En este escenario se ha usado los mismos datos de la tabla 21 y también los datos de entrada de la tabla 22 exceptuando el costo fijo mostrando los nuevos valores en la tabla 28,

Tabla 28: Escenario exitoso de costos 2.

Datos de entrada (base)	Análisis de sensibilidad
Precio unitario	52,00
Demanda	152
Tasa de crecimiento	8%
costo variable (\$unidad)	40,56
Costo de operación (Costo fijo)	0
Rescate	8248,00
Tasa de impuestos	0%
TREMA	9,42%

Fuente: Autor.

7.4.6.1. Estado de gastos

De la misma como en la tabla 24 se analiza para el caso de los nuevos rubros en la tabla 29 se visualiza los nuevos valores.

Tabla 29: Estado de gastos.

Estado de gastos (AÑOS)	0	1	2	3	4	5
Costo unitario Variable	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00
Costo variable	1672,00	1805,76	1950,22	2106,24	2274,74	
Costo de operación	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación	1492,26	1193,81	895,36	596,91	298,45	
Ingreso gravable	4739,74	5536,75	6373,65	7253,62	8180,11	
Impuesto sobre la renta (0%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ingreso neto	4739,74	5536,75	6373,65	7253,62	8180,11	

Fuente: Autor.

7.4.6.2. Estado de flujos de efectivos 2

Con los datos recopilados se muestra el estado de flujos de efectivo en la tabla 30, utilizando el mismo método de la tabla 25.

Tabla 30: Estado de flujos de efectivo 2.

Actividades operativas	0	1	2	3	4	5
Ingreso neto		4739,74	5536,75	6373,65	7253,62	8180,11
depreciación		1492,26	1193,81	895,36	596,91	298,45
Actividades de inversión:						
Inversión	-29845,29					
Rescate						8248,00
Impuesto sobre ganancias						0,00
Flujo de efectivo neto	-29845,29	6232,00	6730,56	7269,00	7850,53	16726,57
					TIR	13%
					VPN	\$3.161,07

Fuente: Autor.

7.4.6.2. Análisis de Sensibilidad (Escenario 2)

Tabla 31: Análisis de Sensibilidad (Escenario 2).

Desviación	-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
Precio unitario	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07
Demanda	-2388,49	-1001,10	386,29	1773,68	3161,07	4548,46	5935,86	7323,25	8710,64
Tasa de crecimiento	2361,51	2559,19	2758,34	2958,96	3161,07	3364,68	3569,78	3776,39	3984,52
Costo unitario variable	-2388,49	-1001,10	386,29	1773,68	3161,07	4548,46	5935,86	7323,25	8710,64
costo de operación	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07
valor de rescate	2109,37	2372,29	2635,22	2898,15	3161,07	3424,00	3686,93	3949,85	4212,17

8. Resultados

8.1. Parámetros establecidos para los criterios del dimensionamiento de un huerto aeropónico automatizado para el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*

8.1.1. Boceto Seleccionado

Como se evidenció en la tabla 4, para la elección del mejor boceto se ha tomado en cuenta las consideraciones que se muestran en la misma, las ponderaciones de importancia dan como ganador al tercer boceto, donde la controlabilidad del sistema y la reducción de riesgos intrínsecos son los factores mas importantes.

La importancia de la controlabilidad del sistema viene provisto por la densidad de plantado en el sistema, entre menor sea la densidad de plantado, mejor es la intervención frente a aquellas que presenten enfermedades o plagas, lo que esto está considerado dentro de reducción de riesgos intrínsecos.

8.1.2. Estructura

En el análisis estructural realizado al material seleccionado (tabla 5) mediante software CAE se efectuó mediante elementos finitos con la métrica por Aspect Ratio que es un parámetro que facilita el software para el análisis del mallado de la estructura, donde permite verificar si el diseño realizado tendrá convergencia en los resultados.

A través de este método se obtuvo un valor de 0.85 que cuenta con una aproximación cercana a 1, lo cual garantiza que existe una convergencia en el método, lo que da validez a los resultados del software. La carga aplicada en el análisis muestra que la deformación es despreciable al deformarse solamente 0.3mm.

Adicionalmente, el factor de seguridad muestra el valor de 2.514 en la figura 12, lo que significa que el material seleccionado puede soportar de dos a tres veces la carga aplicada en este ensayo, dando a conocer que el material soporta la estructura sin sufrir alteración o deformaciones elevadas.

8.1.3. Tuberías

Con los cálculos realizados de las tuberías, se puede deducir que la pérdida total en estas es de $0,2\text{Bar}$, valor que es despreciable para el trabajo de los nebulizadores, este resultado se relaciona tanto a la fricción en las tuberías como en sus accesorios, no obstante para estas pérdidas se considera además la velocidad del fluido ya que en diversas bibliografías así como también como lo menciona Mott (2006), la velocidad de salida de un fluido en una bomba centrífuga se encuentra entre $1,5\text{m/s}$ a 3m/s .

8.1.4. Aislantes térmicos

Lana de roca

En el análisis térmico de este material, se ha utilizado la fórmula de Fourier de conducción de calor. La lana de roca, análoga a una resistencia eléctrica muestra el valor de $45\text{W}/\text{m}^2$ lo que explica que por cada metro cuadrado permite el paso de 45W , lo que significa una alta resistencia térmica donde por cada unidad de energía existe un intercambio de $7.91 \cdot 10^{-3} \text{K}/\text{W}$ o 0.01°C .

Poliestireno expandido

De la misma forma como la lana de roca, la conducción de calor por la parte superior es $3.8\text{W}/\text{m}^2$ lo que demuestra un mejor rendimiento frente a la lana de roca, esto se demuestra mediante su resistencia térmica, para la superficie de este elemento aplicado existe un intercambio de 0.2°K por cada unidad de energía.

8.2. Propuesta de diseño del sistema automatizado de humedad y temperatura para un huerto aeropónico en el cultivo de la papa *Solanum Tuberosum*

8.2.1. Modelo matemático

El modelo matemático es aplicable a un modelo de control, sin embargo con los datos recopilados es poco realista frente a la linearización de la ecuación, dado que la tabla psicrométrica presenta características para cada porcentaje de humedad relativa, donde la pendiente de la curva puede aumentar o disminuir dependiendo el rango de temperaturas que se desee trabajar. Por otra parte se ha idealizado el dato de la masa en la fórmula para el volumen de la cámara aeropónica, en la fórmula (24). El análisis mas exhaustivo para determinar una ecuación matemática mas precisa requiere la intervención de los datos de la absorción de humedad de las raíces de la planta para estimar una frecuencia de riego mas exacta en función del número de plantas por metro cuadrado.

8.2.2. Esquema de control seleccionado

Para el caso de la elección del sistema de control se tomó en consideración la tabla 12 donde los criterios mas fuertes como: controlabilidad de la temperatura y control bacteriano, dan como resultado la fiabilidad del sistema lo que pondera a la propuesta 2 como ganadora de la propuesta.

8.2.3. Controlador seleccionado

Como se muestran las características del controlador en el anexo D, los parámetros de humedad y temperatura son ajustables al sistema mediante la programación de sus variables. Adicionalmente, el precio del producto frente a los otros modelos es mas accesible presentando relación costo-beneficio.

8.3. Análisis de costo de implementación del huerto aeropónico

8.3.1. Costo neto de implementación

Los costos de implementación pueden variar dentro del 5% por los imprevistos lo que dan como costo neto \$19.845,29 dólares.

8.3.2. Análisis de sensibilidad escenario 1

El análisis de sensibilidad realizado con el costo neto calculado en la tabla 20 da como resultado un valor presente neto negativo, lo que explica que para el quinto año no se recupera la inversión y para dicho año hay un déficit de \$-23.271,69 en la figura 30 a continuación se muestra el valor más sensible, si varía el costo unitario, la inversión es recuperable y si incrementa el costo fijo (costo de operación) las pérdidas se incrementan.

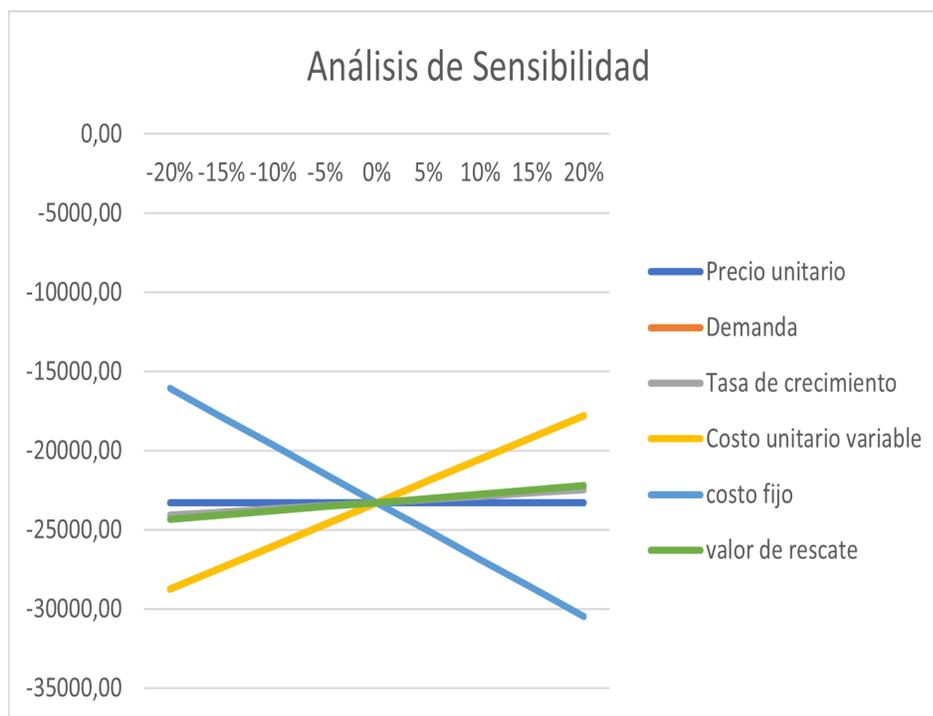


Figura 30: Análisis de Sensibilidad Escenario 1.

Fuente: Autor.

8.3.3. Análisis de sensibilidad escenario 2

El incremento de \$10.000,00 aumenta la inversión, para reemplazar a los costos fijos, con este valor en cero para los 5 años de ciclo de vida del proyecto se muestra la ganancia del

valor presente neto de \$3.161,07 lo que representa que alrededor entre el cuarto y quinto año se recupera la inversión. En la siguiente figura 31 se muestra la sensibilidad a los costos fluctuantes, cabe recalcar que el costo fijo se mantiene lineal por la inversión adicional en el año cero. A esto cabe recalcar que los valores mas sensibles son la demanda y el costo unitario.

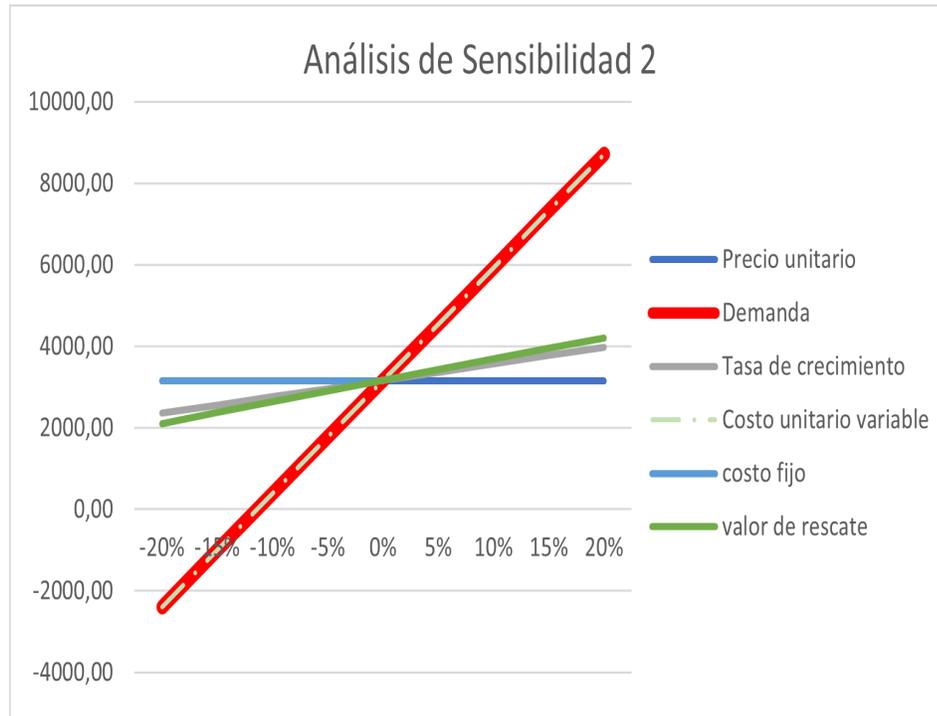


Figura 31: Análisis de Sensibilidad Escenario 2.

Fuente: Autor.

8.3.4. Comparación de escenarios

En la tabla 32 se puede visualizar las casillas para las pérdidas que tienen la desviación, en el escenario 1 se evidencia que la inversión realizada es a pérdida, y se agrava según incrementa el costo de operación como se visualiza en la figura 32 (costo de operación 1).

Por otra parte, para el segundo escenario con un costo de operación cero las ganancias pueden ser evidentes, sin embargo la demanda o el costo variable no pueden disminuir mas allá del -10%, siendo estos los mas sensibles en el escenario 2 como se puede observar en el gráfico 31.

Tabla 32: Comparación de desviación escenario 1 y 2

Desviación	caso	-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%
Precio unitario	1	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69	-23271,69
	2	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07
Demanda	1	-28748,24	-27379,10	-26009,97	-24640,83	-23271,69	-21902,56	-20533,42	-19164,29	-17795,15
	2	-2388,49	-1001,10	386,29	1773,68	3161,07	4548,46	5935,86	7323,25	8710,64
Tasa de crecimiento	1	-24060,74	-23865,66	-23669,13	-23471,14	-23271,69	-23070,77	-22868,37	-22664,47	-22459,08
	2	2361,51	2559,19	2758,34	2958,96	3161,07	3364,68	3569,78	3776,39	3984,52
Costo unitario variable	1	-28748,24	-27379,10	-26009,97	-24640,83	-23271,69	-21902,56	-20533,42	-19164,29	-17795,15
	2	-2388,49	-1001,10	386,29	1773,68	3161,07	4548,46	5935,86	7323,25	8710,64
costo de operación	1	-16058,93	-17862,12	-19665,31	-21468,50	-23271,69	-25074,89	-26878,08	-28681,27	-30484,46
	2	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07	3161,07
valor de rescate	1	-24322,64	-24059,90	-23797,17	-23534,43	-23271,69	-23008,96	-22746,22	-22483,49	-22220,75
	1	2109,37	2372,29	2635,22	2898,15	3161,07	3424,00	3686,93	3949,85	4212,17

Fuente: Autor.

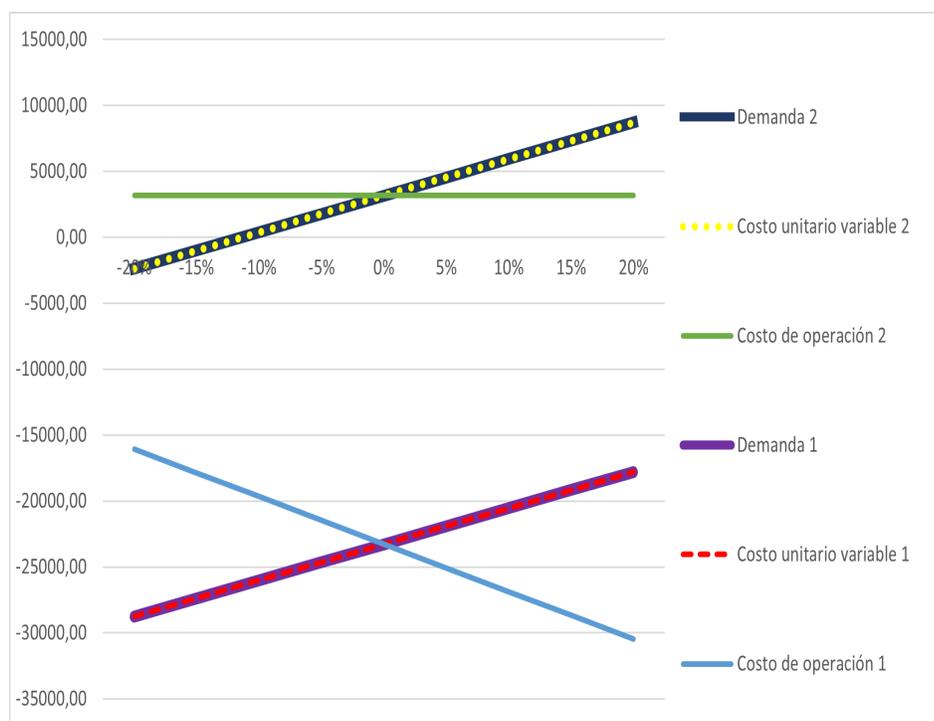


Figura 32: Comparación de sensibilidad.

Fuente: Autor.

9. Conclusiones

Los estudios realizados sobre aeroponía en el cultivo de papa demuestran que existe una relación directa entre la densidad de plantado y el rendimiento de los mismos, las variedades citadas en la sección 7.1.6 muestran el mismo patrón de comportamiento cuando sus densidades varían, entonces, entre mayor es la densidad, mayor es la cosecha del minitubérculo.

Se puede mencionar que, a menores densidades de plantado se puede distribuir de manera más uniforme los nutrientes hacia las raíces de la planta permitiendo mejor absorción de estos para la tuberización.

Con base en requerimientos de cultivo de la papa *Solanum Tuberosum* y los bocetos de la cámara aeropónica realizados, mediante la matriz de Pugh (7.2.2) se permitió establecer que el boceto mas adecuado para la producción es el boceto 3. Adicional a ello los materiales seleccionados como el acero ASTM A36 es capaz de soportar el esfuerzo de 34.2MPa obtenido en la sección (7.2.4.2.) ejercido por los tubérculos considerando esta carga por cada 2m de estructura y también el esfuerzo de cedencia del material (260MPa) el cual no supera el límite del mismo. Por otra parte, los aislantes térmicos, en los cálculos realizados en la sección 7.2.5 demostraron que los materiales son capaces de impedir la conducción de calor desde el exterior.

Las condiciones climáticas y la altitud tienen una repercusión directa en la producción de tubérculos de papa donde el desempeño óptimo se da por dos circunstancias, La altitud a la que se cultiva la papa se encuentra entre los 2500m y 3600m sobre el nivel del mar y a esta altura la temperatura en el ambiente es de 17°C y 23°C aproximadamente, por otra parte, las condiciones climáticas permiten precipitaciones anuales mantener la humedad del suelo, en especial en temporal invernal.

Por otra parte, para llevar a cabo el cultivo en aeroponía de este tubérculo se tuvo que extrapolar estas condiciones climáticas a condiciones controladas mediante un sistema cerrado, y para lograrlo se debieron definir condiciones de frontera. Estas variables se centraron en las raíces de la planta, lo que permitió establecer los parámetros del control de las variables de humedad y temperatura.

Para definir el modelo de control de humedad y temperatura se puede establecer diversos métodos como: cantidad de agua que absorben las raíces y así estimar la humedad necesaria

al interior de la cámara, otro método y es el que se usó es mediante la tabla psicrométrica que relaciona la humedad específica y la temperatura para obtener la humedad relativa. Usando éste método se obtuvo una ecuación que relaciona la temperatura y la humedad de la cámara aeropónica en función del tiempo, mismo que es principal responsable de apertura de válvulas para el ingreso de agua a determinada temperatura para modificar las condiciones al interior del módulo.

Con el modelo matemático se logró obtener el control de humedad y temperatura, con estos parámetros se seleccionó el controlador MT-530e Super, capaz de medir estas variables para su programación mediante control on-off para mantener la temperatura y la humedad requeridos en el sistema. Además en el cual permite la realización de un sistema SCADA para el monitoreo, junto con ello, la tendencia a la alta de aplicar nuevas tecnologías como el IoT lo hacen un dispositivo de alta fiabilidad mediante el monitoreo remoto.

Como se ha definido los elementos necesarios en el diseño de la cámara aeropónica así como también para la propuesta de automatización, el costo de implementación es elevado partiendo desde el punto de vista de la fiabilidad y controlabilidad del sistema. Los elementos de aislamiento térmico permiten asegurar una temperatura estable dentro del módulo con el fin de garantizar que las fluctuaciones de temperatura no afecten la producción del tubérculo, temperaturas entre los 15 y 16°C mantienen el control bacteriano de la cámara aeropónica ya que a la temperatura indicada, la tasa de reproducción de microorganismos patógenos es baja.

El exceso de humedad en el sistema genera pudrición de las raíces, cuestión que ocurre con frecuencia a campo abierto cuando las precipitaciones fluviales son muy seguidas. El control de humedad permite además optimizar el agua que requiere.

Como se mencionó para producir una papa se requiere aproximadamente 25L de agua, cuestión que en este sistema la optimización de recursos es la inspiración para estas nuevas tecnologías de cultivo.

La importancia de un análisis de sensibilidad permite establecer la rentabilidad de un proyecto en el tiempo mediante los flujos de efectivo, la planificación realizada para cinco años en los dos escenarios de costos permitió deducir que importa la cantidad monetaria de la inversión y que existen otros factores que pueden ser clave para el éxito o el fracaso de un proyecto. Como se pudo observar en el análisis de sensibilidad de la sección 7.4.5 y 7.4.6 el proyecto requiere de una mayor inversión para reducir los costos mínimos de operación.

Los análisis de sensibilidad realizados en los dos escenarios permitieron identificar que el patrón de riesgo principal está asociado a los costos de operación, mismos que son un rubro adicional en los egresos del flujo de efectivo o lo que se traduce como el valor mas sensible, si incrementa el costo de operación mayor es el déficit de ganancias en los años de duración del proyecto.

Por otra parte, con el análisis de sensibilidad 2 los factores mas sensibles que pueden afectar a la implementación son los costos unitarios y la demanda, si cae la demanda automáticamente desciende el precio unitario y no debe afectarse mas allá del -10

Finalmente, Se pudo constatar que es necesario realizar análisis económicos para validar la implementación del mismo, y generar ganancias antes que pérdidas.

10. Recomendaciones

Con las investigaciones realizadas en este proyecto la continuación dentro del tema “cultivo en aeroponía de papas” requiere estudios mas profundos sobre la implementación de métodos de fertilización y control de detección plagas así como también el control de pH del cultivo de papas. Adicionalmente se puede profundizar en análisis de materiales que abaraten los costos de implementación y métodos alternos de alimentación energética dado que en este proyecto se ha ha seleccionado materiales puntuales. Además se recomienda profundizar en lo modelo matemático de control de humedad y temperatura, ya que los datos del modelo se fundamentan sobre la linearización de datos sobre una recta de humedad relativa y no se hace mención al que sucede si varía la humedad relativa y la temperatura.

Referencias

- Abdullateef, Böhme y Pinker. (2010). Potato minituber production at different plant densities using an aeroponic system. En *Xxviii international horticultural congress on science and horticulture for people (ihc2010): International symposium on 927* (pp. 429–436).
- Acimco. (2022). *Aislantes termicos y acústicos*. Descargado de <https://www.acimco.com/aislantes-termoacustico/>
- Altos Hornos de México. (2013). *Manual de diseño para la construcción con acero*. Descargado de https://www.ahmsa.com/assets/files/manuales/manual-ahmsa/Capitulo_1.pdf
- Andrade, H., Odilie, B., y Sherwood, S. (2002). La papa en ecuador. En M. Pumishaco y S. Sherwood (Eds.), (primera ed.). Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Descargado de <https://cipotato.org/wp-content/uploads/Documentacion%20PDF/Pumisacho%20y%20Sherwood%20Cultivo%20de%20Papa%20en%20Ecuador.pdf>
- Andrade, J., Kromann, P., y Otazú, V. (2015). *Manual para la producción de semilla de papa usando aeroponía: diez años de experiencias en colombia, ecuador y Perú*. CIP, INIAP and CORPOICA.
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., Campos Olgún, V., Colli Serrano, M. T., y cols. (2003). *Termodinámica*.
- Centro Internacional de la Papa. (2021). *Cómo crecen las papas*. <https://cipotato.org/es/lapapa/como-crecen-las-papas>. Consultado:01/01/2022.
- Chan, P. (2009). *Fundamentos de ingeniería económica* (2da ed.). Pearson educación.
- Chiipanthenga y colaboradores. (2012). Potential of aeroponics system in the production of quality potato (*solanum tuberosum* l.) seed in developing countries. *African Journal of Biotechnology*, 11(17), 3993–3999.
- Cobos, E. (2019, 3). *La papa nacional tiene buena producción pero sufre por la demanda | gestión*. Descargado de <https://revistagestion.ec/economia-y-finanzas-analisis/la-papa-nacional-tiene-buena-produccion-pero-sufre-por-la-demanda>
- Cortez, M. R., y Hurtado, G. (2002). *Guía técnica cultivo de la papa*. CENTA. Descargado de <https://docplayer.es/5817796-Guia-tecnica-cultivo-de-la-papa.html>
- Ditevalicopor. (2017). *Láminas de aislamiento*. Descargado de <https://ditevalicopor.com/laminas-de-cielo-raso/>
- FAO. (2008). *La papa: Orígenes - año internacional de la papa 2008*. Descargado de

- <https://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/origenes.html>
- Farran, I., y Mingo-Castel, A. M. (2006). Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research*, 83(1), 47–53.
- Flores, C. E. (2010). *Oleodinámica: Potencia hidráulica, motor de la industria. parte.*
- Helios estrategia Ecuador. (2019). <https://heliostategiaecuador.com/>.
- Hibbeler, R. (2011). *Mecánica de materiales* (8va ed.). Pearson Educación.
- (s.f.). Descargado de <https://articulo.mercadolibre.com.ec/>
- (s.f.). Descargado de <https://maruplast.com/nebulizador/>
- (s.f.). Descargado de <https://www.amazon.com/>
- (s.f.). Descargado de <https://www.herramientasingeneria.com/>
- INIAP. (2014). *Papa solanum tuberosum*. Descargado de <http://tecnologia.iniap.gob.ec/index.php/explore-2/mraiz/rpapa>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2021). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua 2020*. Descargado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Presentacion%20ESPAC%202020.pdf
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2015). Principios agronómicos en el cultivo de la papa. <https://inta.gob.ar/noticias/el-cultivo-de-papa> Consultado:12/11/2021.
- Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., y Buttar, N. A. (2018, 1). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions*, 13, 338-352. Descargado de https://www.researchgate.net/publication/325465046_Modern_plant_cultivation_technologies_in_agriculture_under_controlled_environment_A_review_on_aeroponics doi: 10.1080/17429145.2018.1472308
- METEORED. (2021). Histórico del tiempo en cuenca. <https://www.meteored.com.ec/tiempo-encuenca> – America + Sur – Ecuador – Azuay – –1 – 20244.html?d = historico.Consultado : 01/01/2022.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Pearson educación.
- Nichols, M. A. (2009). *Aerponía y papas*. Descargado de http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/boletin43/43_Aerponia_Papa.pdf
- NOVAGRIC. (2016). Diseño de invernaderos. <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades> Consultado:01/01/2022.
- ONU. (2021). *Población | naciones unidas*. Descargado de <https://www.un.org/es/global-issues/population>

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2002). Agua y cultivos, logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Descargado de www.fao.org/landandwater
- Otazú, V. (2010). *Manual de producción de semilla de papa de calidad usando aeroponía* (ed ed.). Centro Internacional de la Papa (CIP). Descargado de <http://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/08/005566.pdf>
- Polyfex. (2021). Poliestireno expandido. <http://www.polyfex-eps.com/planchas-poliestireno-expandido/>. Consultado:01/01/2022.
- Pumisacho, M., y Sherwood, S. (2002). *El cultivo de la papa en ecuador*. Editorial Abya Yala.
- Pumisacho, M., y Velásquez, J. (2009). Manual del cultivo de papa para pequeños productores. Quito. INIAP, COSUDE.
- Punina, E. (2014). *Evaluación agronómica del cultivo de papa (solanum tuberosum) cv fripapa, a la aplicación de tres abonos completos* (B.S. thesis).
- Repsol. (2022). *Polietileno de alta y baja densidad*. Descargado de <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/quimica/productos/polietileno/index.cshtml>
- Resh, H. M. (2012). *Producción de alimentos hidropónicos: una guía definitiva para el jardinero doméstico avanzado y el cultivador hidropónico comercial*.
- Ritter y colaboradores. (2001). Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research*, 44(2), 127–135.
- Sensors, R. (2021). El sensor de temperatura. <https://www.rechner-sensors.com/es/documentacion/knowledge/el-sensor-de-temperatura: :text=Lo> Consultado:01/01/2022.
- Tunio y colaboradores. (2020). *Producción de papa en aeroponía: un sistema emergente de cultivo de alimentos en agricultura sostenible para la seguridad alimentaria* (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA ed.).
- Vignola, R., y colaboradores. (2017). Ficha técnica cultivo de papa.
- Villanueva, R. (2017). Manual del cultivo de papa para pequeños productores en la sierra norte del Perú. *AsociaciónPataz*.
- Wang, K., He, W., Ai, Y., Hu, J., Xie, K., Tang, M., ... others (2017). Optimizing seed potato production by aeroponics in china. *Philippine Journal of Crop Science*, 42(1), 69–74.
- YARA. (2022). Principios agronómicos en el cultivo de la papa. <https://www.yara.com.ec/nutricion-vegetal/papa/principios-agronomicos-en-el-cultivo-de-la-papa/> Consultado:01/01/2022.

ANEXOS

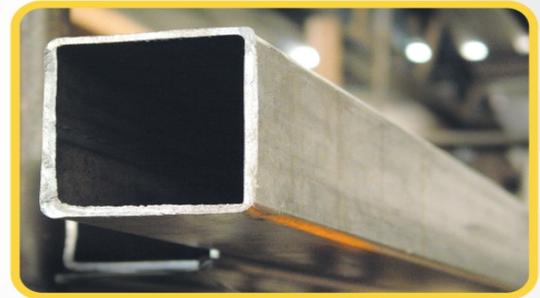
Anexo A: Hoja de datos del tubo estructural cuadrado



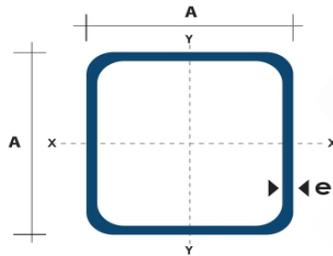
TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 2415
Calidad:	SAE J 403 1008
Acabado:	Acero negro o Galvanizado
Largo Normal:	6.00m y medidas especiales
Dimensiones:	Desde 20mm a 100mm
Espesores:	Desde 1,20mm a 5,00mm



TUBERÍA



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm ³
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84



www.dipacmanta.com

Anexo B: Hoja de datos Tubería PVC Plastigama

SOLUCIONES PARA RIEGO PLASTIGAMA

ESPECIFICACIONES PARA TUBERÍAS PVC (U)

Especificaciones para Tuberías con Unión por sellado elastomérico (UZ) y Unión por cementado solvente (EC) para riego.

Diámetro Nominal (mm)		Diámetro Interior mm	Espesor Nominal mm	Presión de Trabajo		
UNIÓN U/Z	UNIÓN E/C			MPa	PSI (lb/pulg ²)	Kgf/cm ²
	20	17.8	1.1	1.25	181	12.75
		16.8	1.6	2.00	290	20.40
	25	22.8	1.1	1.00	145	10.20
		21.8	1.6	1.60	232	16.32
	32	29.8	1.1	0.80	116	8.16
		28.8	1.6	1.25	181	12.75
	40	37.8	1.1	0.63	91	6.43
		36.8	1.6	1.00	145	10.20
		36.0	2.0	1.25	181	12.75
50		47.4	1.3	0.63	91	6.43
		46.8	1.6	0.80	116	8.16
		46.0	2.0	1.00	145	10.20
		45.0	2.5	1.25	181	12.75
63		59.8	1.6	0.63	91	6.43
		58.8	2.1	0.80	116	8.16
		58.0	2.5	1.00	145	10.20
		56.8	3.1	1.25	181	12.75
75		72.0	1.5	0.50	73	5.10
		71.2	1.9	0.63	91	6.43
		70.2	2.4	0.80	116	8.16
		69.0	3.0	1.00	145	10.20
		67.6	3.7	1.25	181	12.75
90		86.4	1.8	0.50	73	5.10
		85.4	2.3	0.63	91	6.43
		84.2	2.9	0.80	116	8.16
		82.8	3.6	1.00	145	10.20
		81.2	4.4	1.25	181	12.75
110		105.6	2.2	0.50	73	5.10
		104.6	2.7	0.63	91	6.43
		103.2	3.4	0.80	116	8.16
		101.6	4.2	1.00	145	10.20
		99.6	5.2	1.25	181	12.75
140		134.4	2.8	0.50	73	5.10
		133.2	3.4	0.63	91	6.43
		131.4	4.3	0.80	116	8.16

Anexo C: Tabla de coeficientes K para pérdidas de accesorios en tuberías

Pieza, conexión o dispositivo	K_f
Rejilla de entrada	0.80
Válvula de pie	3.00
Entrada cuadrada	0.50
Entrada abocinada	0.10
Entrada de borda o reentrada	1.00
Ampliación gradual	0.30
Ampliación brusca	0.20
Reducción gradual	0.25
Reducción brusca	0.35
Codo corto de 90°	0.90
Codo corto de 45°	0.40
Codo largo de 90°	0.40
Codo largo de 45°	0.20
Codo largo de 22° 30'	0.10
Tee con flujo en línea recta	0.10
Tee con flujo en ángulo	1.50
Tee con salida bilateral	1.80
Válvula de compuerta abierta	5.00
Válvula de ángulo abierta	5.00
Válvula de globo abierta	10.0
Válvula alfalfera	2.00
Válvula de retención	2.50
Boquillas	2.75
Controlador de gasto	2.50
Medidor Venturi	2.50
Confluencia	0.40
Bifurcación	0.10
Pequeña derivación	0.03
Válvula de mariposa abierta	0.24

Disponible en: www.conagua.gob.mx/

Anexo D: Manual de controlador MT-530e Plus



1. DESCRIPCIÓN

El **MT-530E Super Plus** tiene tres salidas: una para control de la temperatura, una para control de la humedad y una tercera salida auxiliar que actúa como una segunda etapa de control de temperatura, control de humedad, alarma o temporizador (temporizador) cíclico. Este controlador es adecuado para baja y media humedad relativa (10 a 85% sin condensación). Sus sensores de temperatura y humedad se unen en un solo bulbo, lo que reduce el espacio de instalación y el cableado. También incluye un alarma audible (buzzer) y una función inteligente, el bloqueo del función, que evita que los usuarios no autorizados cambien los parámetros del control. El instrumento tiene una comunicación serial para la conexión con el SITRAD®. Producto en conformidad UL Inc. (Estados Unidos y Canadá).

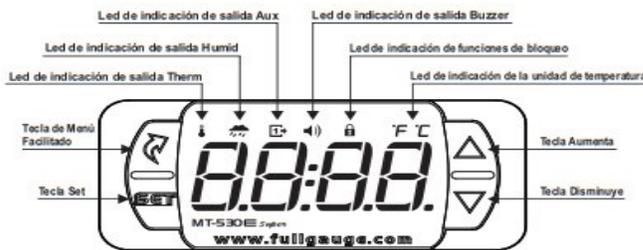
2. APLICACIONES

- Deshumidificadores
 - Bodegas
 - Secado de granos
 - Humidificadores
 - Climatizados
 - Climatizados y ambientes de TI (Data Centers)
- Para alto porcentaje de humedad en la presencia de agua de condensación, utilizar el modelo de AHC-80 Ripius.

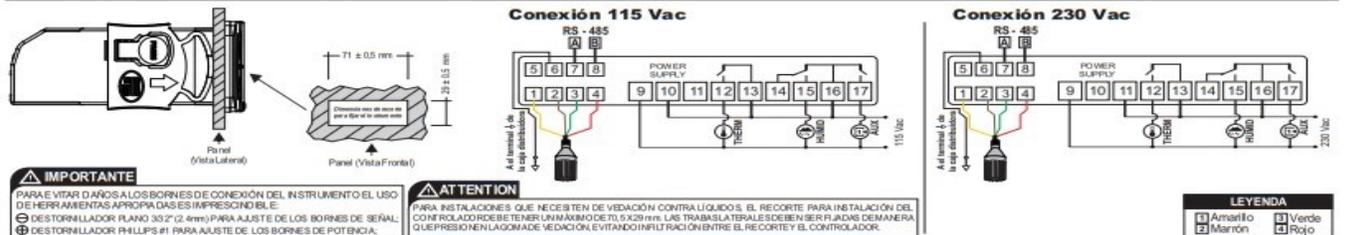
3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Alimentación directa	MT-530E Super: 115 o 230 Vac $\pm 10\%$ (50/60 Hz) MT-530EL Super: 12 o 24 Vac/dc $+10\%$
Temperatura de control	-10 a 70.0 °C $\pm 1.5^\circ\text{C}$ (con resolución de 0.1°C) 14 a 158 °F $\pm 3^\circ\text{F}$ (con resolución de 1°F)
Temperatura de operación	0 a 50°C / 32 a 122°F
Humedad de control	10 a 85%HR $\pm 5\%$ HR (con resolución de 0.1%HR)
Humedad de operación	10 a 85% HR (sin condensación)
Corriente máxima por salida	Therm \downarrow : 16(8)A/250Vac 1HP Humid \rightleftharpoons : 5(3)A/250Vac 1/8HP Aux B: 5(3)A/250Vac 1/8HP
Dimensiones (mm)	76 x 34 x 77 mm (AxXxP)
Dimensiones del recorte para fijación del instrumento	71 \pm 0.5 x 29 \pm 0.5 mm (vide ítem 5)

4. INDICACIONES Y TECLAS



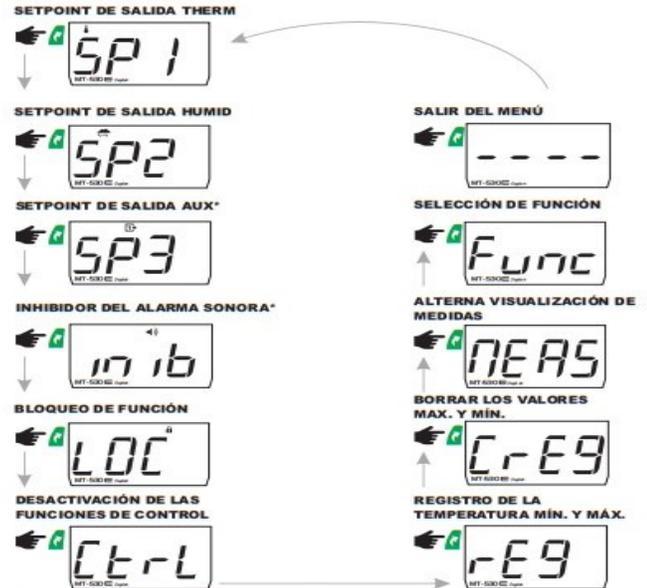
5. INSTALACIÓN - PANEL Y CONEXIONES ELÉCTRICAS



6. OPERACIONES

6.1 Mapa del menú facilitado

Al pulsar la tecla **M**, es posible navegar a través de los menús de funciones. Abajo vea mapa funciones:



* Estos parámetros se muestran cuando sea necesario.

6.2 Mapa de teclas facilitadas

Cuando el controlador está en exhibición de la temperatura, las siguientes teclas directas de acceso se utilizan para las siguientes funciones:

	Pulse por 2 segundos: Ajuste del setpoint.
	Pulsación breve: Conmutar exhibición de temperatura o humedad para 4s.
	Pulse por 2 segundos: Cuando el buzzer está activo inhibe la alarma.
	Pulsación breve: Visualización de los registros de las medidas mín. y máx.
	Pulse por 2 segundos: Mientras se muestran los archivos, borrar la historia.
	Introduce la selección de funciones.

6.3 Operaciones básicas

6.3.1 Ajuste de la temperatura y la humedad deseada (setpoint)

Para entrar en el menú de ajuste dos setpoints pulse la tecla **M** por 2 segundos. El mensaje **[SP 1]** será exhibida en el display, en seguida exhibirá el valor del setpoint de la salida Therm para ajuste. Utilice las teclas **▲** y **▼** para modificar el valor y confirme pulsando **M**. En seguida será exhibida el mensaje **[SP 2]** indicando el ajuste del setpoint de la salida Humid. Otra vez utilice las teclas **▲** y **▼** para modificar el valor y confirme pulsando **M**. Si el modo de operación de la salida Aux exija el ajuste del setpoint será exhibida el mensaje **[SP 3]** y permitirá el ajuste de la misma forma de los anteriores. Al final aparecerá el mensaje **[---]** que indica la finalización de la configuración. El setpoints también se puede ajustar individualmente en el menú facilitado.

Anexo E: Catálogo Enfriadores de calor

Circuladores de Agua Fría (enfriador)

Potente Sistema de Refrigeración Cerrado

Series CF

Rango de temperatura -20°C ~ Temp. ambiente

Capacidad 4L CF301/311 16L CF800/811

Sistema cerrado y de ahorro de agua con una excelente capacidad de enfriamiento



- Refrigerante ecológico utilizado para la refrigeración
- Panel táctil resistente al agua con gran pantalla LED y hoja de atajos para facilitar el ajuste
- Menor consumo de energía y menor pérdida de capacidad de enfriamiento mediante la fijación de la tapa resistente al calor
- Potente enfriamiento y gran ahorro de energía en combinación con la destilación del evaporador rotatorio
- Cuando se utiliza CF800 / 810 se pueden conectar hasta 4 evaporadores rotatorios ahorrando inversión y costo de operación

Especificaciones

Modelo	CF301	CF311	CF800	CF810
Tipo de circulación	Circulación cerrada			
Temperatura ambiente de funcionamiento	5 a 35°C			
Rango de temperatura de funcionamiento	-20°C ~ Temperatura ambiente			
Capacidad de enfriamiento	~450W (385Kcal/h) a la temp. de líquido 10°C ~360W (380Kcal/h) a la temp. de líquido 0°C ~270W (230Kcal/h) a la temp. de líquido -10°C		~1050W (830Kcal/h) a la temp. de líquido 10°C ~910W (780Kcal/h) a la temp. de líquido 0°C ~670W (570Kcal/h) a la temp. de líquido -10°C	
Control de temperatura	Control de encendido/apagado en refrigerador			
Sensor de temperatura	Termopar tipo T (con tubo de protección SUS)			
Ajuste/visualización de temperatura	Ajuste digital / LED de visualización			
Refrigerador	Refrigeración por aire, 450W		Refrigeración por aire, 600W	
Refrigerante	R404A			
Bomba de circulación	Bomba magnética 10/15W		Bomba magnética 65/65W	
Capacidad de circulación (50/60Hz)	Máx. flujo de agua	6.3/7.2L/min	10.0/11.8L/min	
	Caudal máx. de la bomba	12.8/14.3L/min	22.0/22.0L/min	
	Elevación máx.	4.0/5.6m	10.3/14.3m	
	Elevación máx. de la bomba	4.1/5.7m	10.0/13.5m	
Bobina de refrigeración	Cobre niquelado			
Boquilla de circulación exterior	O.D. 10.5mm para entrada y salida con boquilla de manguera			
Dispositivo de seguridad	Interruptor de fugas eléctrico, relé de sobrecarga del refrigerador, protector térmico de la bomba, temporizador de retardo de protección del refrigerador			
Otras funciones	Drenaje, desborde del agua			
Dimensión del baño de agua	ø151x177mm		ø300 x H235mm	
Material del baño de agua	SUS304			
Capacidad del baño de agua	~4L (Cantidad de líquido 3L)		~16L (Cantidad de líquido 14L)	
Fuente de alimentación (50/60Hz)	AC115V 5.6A	AC220V 3A	AC115V 12.5A	AC220V 7A
Dimensión externa (W x D x H mm)	228 x 508 x 546	228 x 612 x 546	350 x 480 x 840	350 x 480 x 925
Peso	~50kg	~50kg	~72kg	~72kg
Accesorios incluidos	Manguera de circulación (1.5m) x2, abrazadera de alambre x2, tapa			

Anexo F: Catálogo Enfriadores de calor

Mono S3 - Halfcut

Electrical data under STC (Standard Test Conditions: 1000 W/m², 25 °C, AM 1.5)

Rated power	P_{max}	365 W	370 W	375 W
Sorting limits of performance		0/+3 %	0/+3 %	0/+3 %
Voltage	U_{MPP}	34.20 V	34.40 V	34.60 V
Open circuit voltage	U_{OC}	40.70 V	40.90 V	41.10 V
Current	I_{MPP}	10.68 A	10.76 A	10.84 A
Short-circuit current	I_{SC}	11.43 A	11.52 A	11.60 A
Efficiency		20.00 %	20.30 %	20.60 %

Temperature data

Operating temperature		- 40° C ~ + 85° C
Nominal operating cell temperature		45 ± 2° C
Power temperature coefficient	$T_K(P_{MPP})$	- 0.390 %/K
Voltage temperature coefficient	$T_K(U_{OC})$	- 0.295 %/K
Current temperature coefficient	$T_K(I_{SC})$	0.039 %/K

Further information

Number of cells	120 monocrystalline half cells (6 x 20)	
Size of cell	166 x 83 mm	
Module dimensions	1755 x 1038 x 35 mm	
Type of Frame	Anodized aluminium alloy	
Max. system voltage	1500 V	
Reverse current loading capability	20 A	
Glass thickness	3.2 mm	
Weight	19.5 kg	
Module connection	MC4 compatible, 4.0 mm ² , cable length: (+) ≥ 1200 mm, (-) ≥ 1200 mm	
Junction box rating	IP68	
Allowable Hail Load	25 mm iceball with velocity of 23 m/s	
Snow load	5400 Pa $\hat{=}$ 550 kg/m ²	

15-year product warranty, 25-year linear performance warranty according to our additional warranty conditions for solar power modules of the "Mono S3" product series, which we will gladly send you.

Subject to technical modifications with corresponding follow-up certifications. Errors excepted. Illustration similar.

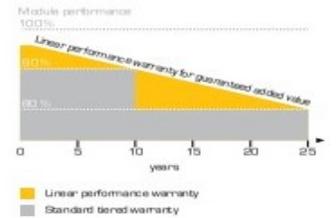
Mono S3 - Halfcut
(half cell module)

Note:
Ensure correct polarity!

Packaging Specifications

Truck	
Dimension pallet (L/W/H)	180/113/117.5 cm
Weight pallet	approx. 635 kg
Modules per pallet	30
Modules per truck	840

Shipment	
Dimension pallet (L/W/H)	180/113/117.5 cm
Weight pallet	approx. 635 kg
Modules per pallet	30
Modules per container [40' HC]	780



Your specialist dealer:

SF Solar Fabrik GmbH & Co. KG
 Im Gewerbegebiet 12
 63831 Wiesen
 Germany

Phone: +49 (0)6096 9 700-790
 Fax: +49 (0)6096 9 700-728
 Mail: info@solar-fabrik.de
 Web: www.solar-fabrik.de

Anexo G: Simulaciones Software CAE

A: Static Structural

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: m

Time: 1

21/1/2022 0:10

