

Diseño y Construcción de un Sistema de Producción de Forraje de Maíz Hidropónico

Jhoan Sebastián Murillo Possos y Jaime Andrey Rodríguez Fernández

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela De Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	18
1. Planteamiento del Problema	19
2. Justificación	20
3. Objetivos.....	21
3.1 Objetivo general	21
3.2 Objetivos específicos.....	21
4. Revisión de Literatura.....	22
4.1 Estado del Arte	22
4.2 Marco conceptual	23
4.2.1 Hidroponía.....	24
4.2.2 Forraje verde hidropónico (FVH).....	24
4.2.3 Proceso de Producción de FVH.....	25
4.2.4 Factores que Influyen en la Optimización de la Producción	25
4.3 Marco legal	27
5. Diseño conceptual.....	29
5.1 Despliegue de la Función Calidad	29
5.1.2 Requerimientos del Consumidor	29
5.1.3 Organización de Requerimientos.....	29
5.2 Matriz de Calidad	30

	Pág.
5.3 Planteamiento de Alternativa.....	31
5.4 Evaluación de Alternativas	31
5.5 Especificación de Alternativa Ganadora	31
6. Diseño y construcción del prototipo	33
6.1 Diseño Conceptual de los Subsistemas.....	33
6.1.1 Estructura.....	33
6.1.2 Sistema de Acondicionamiento de Aire	35
6.1.3 Sistema de Iluminación	37
6.1.4 Sistema de Fertirriego.....	37
6.1.5 Sistema de control	40
6.2 Diseño en Detalle del Prototipo.....	42
6.2.1 Estructura.....	42
6.2.1.1 Selección de Bandejas.	42
6.2.1.2 Diseño Viga que Soporta la Carga.	43
6.2.1.3 Cordón de Soldadura.	44
6.2.1.4 Paredes del Prototipo.....	45
6.2.1.5 Calculo Unión de las Paredes y Estructura.....	45
6.2.2 Sistema de Acondicionamiento de Aire	46
6.2.2.1 Renovación de Aire.	46
6.2.2.2 Cálculos térmicos	48
6.2.2.3 Perdida de calor por las paredes.	48

	Pág.
6.2.2.4 Requerimientos térmicos debido a la renovación de aire.....	52
6.2.2.5 Carga térmica para calentar el fvh.....	52
6.2.2.6 Resistencia eléctrica de calefacción.....	53
6.2.3 Sistema de Riego.....	55
6.2.4 Sistema de Iluminación.....	57
6.2.5 Sistema de Control.....	58
6.2.5.1 Control de Temperatura.....	58
6.5.2.2 Control de ph y EC.....	59
6.3 Construcción del Prototipo y Puesta en Marcha.....	59
6.3.1 Estructura de soporte.....	59
6.3.2 Puesta en marcha del prototipo.....	66
6.3.2 Rendimiento del cultivo.....	67
7. Diseño en Detalle del Sistema de Producción de 500kg.....	68
7.1 Parámetros de Diseño.....	68
7.2 Diseño de la Estructura y Selección Del Contenedor.....	68
7.2.1 Selección de bandejas de siembra.....	69
7.2.2 Selección de Bandejas.....	70
7.2.3 Selección del Contenedor.....	72
7.2.4 Distribución de las Bandejas.....	72
7.2.5 Diseño de la Estructura que Soporta las Bandejas.....	75
7.2.5.1 Diseño de la viga.....	76

	Pág.
7.2.5.2 Cordón de Soldadura que Soporta la Viga.	77
7.5.2.3 Calculo parales centrales.	77
7.3 Diseño de sistema de calefacción	78
7.3.1 Renovación de Aire	79
7.3.2 Cálculos térmicos	81
7.3.2.1 Pérdida de Calor por las Paredes.	82
7.3.2.2 Requerimientos Térmicos Debido a la Renovación de Aire	83
7.3.2.3 Calor Requerido en el Calentamiento del FVH:.....	83
7.3.3 Selección de Batería de Calefacción Eléctrica	85
7.3.4 Cálculo del Flujo de Aire Retorno.....	86
7.3.4.1 Diseño Ventilación del Flujo de Retorno.	87
7.3.4.2 Perdida de carga en el ducto.	88
7.3.4.3 Perdida de carga en los accesorios, succión y descarga	89
7.2.4.4 Pérdida total de carga en todos los accesorios.....	90
7.3.4.5 Presión estática requerida.	90
7.4 Diseño del Sistema De Fertirriego Por Nebulización.....	92
7.4.1 Dimensionamiento predeterminado.....	92
7.4.2 Selección de nebulizadores.....	94
7.4.3 Diámetro De Riego Y Dimensionamiento de Tubería	95
7.4.3.1 Diámetro Mínimo de la Tubería.	96
7.4.4 Dimensionamiento del Tanque Principal y Recirculación	100

	Pág.
7.4.4.1 Recirculación de Solución Nutritiva.	100
7.4.5 Diseño de la Estación de Bombeo	101
7.4.5.1 Pérdidas Totales de Carga en Tubería, Estado Estacionario.	101
7.4.5.2 Cálculo del NPSH Disponible	104
7.5 Diseño del sistema de iluminación	104
7.5.1 Cantidad de cinta de iluminación necesaria.	105
7.5.2 Potencia de consumo	106
7.6 Diseño de sistema de control	106
7.6.1 Control de calefacción	107
7.6.2 Control de bombeo y calidad de solución nutritiva.....	108
7.6.3 Control de iluminación	110
7.6.4 Control de potencia eléctrica	110
7.6.5 Conversión AC DC.....	111
8. Viabilidad técnico-económica	111
8.1 Viabilidad técnica.....	112
8.1.1 FVH en dietas de bovinos.....	112
8.2 Viabilidad económica.....	113
8.2.1 Costeo de la inversión inicial	113
8.2.2 Costo de operación del sistema	113
8.2.2.1 Costeo de consumo de energía.	113
8.2.2.2 Costeo del maíz como materia prima.	115

	Pág.
8.2.3 Recuperación de la inversión.....	116
9. Conclusiones.....	117
10. Recomendaciones	118

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Características de configuraciones técnicas de alternativas	31
Tabla 2. Evaluación de las alternativas según los parámetros seleccionados	31
Tabla 3. Función de calidad para subsistema de estructura en prototipo	34
Tabla 4. Caracterización de alternativas de materiales para la estructura	35
Tabla 5. Selección de alternativas para el subsistema Estructura.....	35
Tabla 6. Función de calidad para el subsistema de calefacción	36
Tabla 7. Características técnicas de las alternativas de calefacción	37
Tabla 8. Selección de alternativas subsistema de calefacción.....	37
Tabla 9. Características alternativas difusión de fertirriego	39
Tabla 10. Proyección de la producción	42
Tabla 11. Cálculo de área de cultivo	42
Tabla 12. Dimensiones del área de siembra	43
Tabla 13. Área de cultivo en prototipo	43
Tabla 14. Resultados de cálculos de esfuerzos.....	44
Tabla 15. Dimensiones lámina de PVC.....	44
Tabla 16. Factores de seguridad para juntas entre paredes y estructura.....	46
Tabla 17. Temperaturas para el análisis térmico	46
Tabla 18. Dimensiones del volumen de aire para acondicionar	47
Tabla 19. Volumen y flujo volumétrico en subsistema de calefacción de prototipo.....	47
Tabla 20. Características del ventilador	48

	Pág.
Tabla 25. Contantes para análisis térmico de paredes	49
Tabla 22. Propiedades de aire para cálculos térmicos	51
Tabla 23. Constantes de flujo de aire para cálculos térmicos.....	51
Tabla 24. Resultados de solución de ecuaciones de transferencia de calor.....	51
Tabla 24. Contantes térmica del maíz y el agua	53
Tabla 25. Calor de germinación	53
Tabla 26. Propiedades de la resistencia níquel-cromo	54
Tabla 27. Valores para análisis de resistencia térmica	55
Tabla 28. Lista de componentes en el sistema de control	63
Tabla 29. Variables de controlador.....	64
Tabla 30. Resultados constantes de sintonización PID	66
Tabla 31. Densidad de siembra para diseño final.....	70
Tabla 32. Proyección de producción para diseño final.....	70
Tabla 33. Dimensiones de bandeja de siembra.....	71
Tabla 34. Número de bandejas necesarias.....	71
Tabla 35. Bandejas de cultivo totales	71
Tabla 36. Área de cultivo cubierta por bandejas	72
Tabla 37. Dimensiones contenedor 40´ HIGH CUBE	72
Tabla 38. Pisos, filas y columnas necesarios para el sistema de producción	73
Tabla 39. Filas de estructura.....	74
Tabla 40. Esfuerzos calculados de la resistencia.....	76

	Pág.
Tabla 41. Calculo del cordón de soldadura	76
Tabla 42. Propiedades mecánicas de perfiles seleccionados	78
Tabla 43. Carga crítica y factor de seguridad.....	78
Tabla 44. Temperaturas de diseño	79
Tabla 45. Volumen y flujo volumétrico del diseño	80
Tabla 46. Valores mecánicos del ventilador seleccionado	81
Tabla 47. Constantes de flujo para cálculos térmicos en el diseño térmico	82
Tabla 48. Constantes de transferencia de calor en sistema térmico	83
Tabla 49. Calor requerido para desarrollo de cultivo	83
Tabla 50. Constantes de térmicas del maíz.....	85
Tabla 51. Energía necesaria para germinación.....	85
Tabla 52. Caudal de retorno en flujo de aire	87
Tabla 53. Calculo del flujo de aire de retorno.....	89
Tabla 54. Perdida de presión por accesorios en sistema de ventilación	90
Tabla 55. Presión estática de ventilador	91
Tabla 56. Características geométricas para el diseño de tubería: un área de producción.....	93
Tabla 57. Datos técnicos de aspersor.....	95
Tabla 58. Coeficientes de cálculo ecuación de Darcy - Weisbach.....	98
Tabla 59. Constantes para análisis de pérdida de carga en tubería.....	99
Tabla 60. Coeficientes de cálculo de mecánica de fluidos	99
Tabla 61. Columnas de presión y NPSHd	104

	Pág.
Tabla 62. Sustitución de suplemento nutricional en dieta de bovinos.....	113
Tabla 64. Recuperación de la inversión.....	117

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Forraje verde hidropónico	19
Figura 2. Alimentación de bovinos mediante FVH.....	20
Figura 3. Campos de pastoreo durante la estación seca (verano).....	24
Figura 4. Modelo del sistema presente en el mercado.....	26
Figura 5. Límites aceptables para propiedades fisicoquímicas en vertidos de aguas residuales de la agroindustria	28
Figura 6. Matriz de Calidad para el sistema de producción de FVH.....	30
Figura 7. Esquema del contenedor propuesto en la alternativa ganadora	32
Figura 8. Función de calidad para el subsistema de bombeo	39
Figura 9. Selección de alternativas para el subsistema de bombeo	40
Figura 10. Flujogramas para sistema de control.....	41
Figura 11. Medidas para el dimensionamiento de paredes del prototipo	45
Figura 12. Diagrama de flujo térmico en prototipo	48
Figura 13. Montaje de resistencia NiCr.....	54
Figura 14. Vista frontal del subsistema de bombeo en el prototipo.....	56
Figura 15. Bomba de diafragma para nebulización.....	56
Figura 16. Instalación de la iluminación	58
Figura 17. Estructura construida y recubierta con PVC	59
Figura 18. Resistencia de calefacción.....	60
Figura 19. Sistema de iluminación en funcionamiento en prototipo.....	60

	Pág.
Figura 20. Montaje de dosificación de reguladores de PH en prototipo	60
Figura 21. Montaje de componentes electrónicos para el hardware del sistema de control.....	62
Figura 22. Temperatura en función del tiempo con 100% del voltaje disponible.....	62
Figura 23. Valores lambda de sintonización de PID	64
Figura 24. Montaje de simulación en Simulink.....	65
Figura 25. Simulación de controlador PID; $\lambda=6500$	65
Figura 26. Etapas de lavado y pre-germinación de semilla.....	66
Figura 27. Germinación de semillas y resultado final del cultivo	67
Figura 28. Peso inicial y final del cultivo.....	67
Figura 29. Esquemático de proceso de siembra en contenedor.....	68
Figura 30. Esquemática distribución de bandejas ene estructura	73
Figura 31. Esquemática vista superior de sistema de producción	74
Figura 32. Hileras de la estructura.....	75
Figura 33. Pieza de estructura.....	75
Figura 34. Diagrama de carga axial.....	77
Figura 35. Ventilador seleccionado extracción de aire.....	80
Figura 36. Diagrama de flujo de calor en pared	82
Figura 37. Sistema de ventilación del sistema.....	87
Figura 38. Sistema de retorno.....	87
Figura 39. Diagrama de caída de presión por unidad de longitud.....	88
Figura 40. Coeficientes de Perdida.....	90

	Pág.
Figura 41. Curva característica ventilador y punto de funcionamiento.....	91
Figura 42. Tubería para una zona de producción	92
Figura 43. Cobertura de área según gotas.....	94
Figura 44. FLF Rivulis seleccionado para nebulización	95
Figura 45. Diagrama instalación de nebulizadores.....	96
Figura 46. Flujo de fluido em accesorio.....	97
Figura 47. Diagrama de pérdidas energéticas en tuberías	101
Figura 48. Válvulas para direccionamiento de bombeo	103
Figura 49. Ubicación de cintas de iluminación en estructura.....	105
Figura 50. Ubicación de muestreo de temperatura	107
Figura 51. Arquitectura algoritmo de control en sistema de retorno.....	108
Figura 52. P&ID de la nebulización y control de parámetros de la solución nutritiva	109
Figura 53. Algoritmo para controlador 2.....	110
Figura 54. Gráfico de Histórico y proyección de costo de energía	114
Figura 55. Grafica de precios promedio de maíz en diferentes abastos del país	114
Figura 56. Promedios de precios del maíz en centros abastos del país	115
Figura 57. Sal Somex Ceba	116

Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Sistema de producción de FVH

Apéndice B. Procedimiento matemático para el cálculo del área de cultivo necesaria

Apéndice C. Algunos equipos usados en el prototipo

Apéndice D. Cálculos para el diseño de viga que soporta la carga-prototipo

Apéndice E. Cálculo de soldadura

Apéndice F. Cálculo Unión de las Paredes y Estructura.

Apéndice G. Cálculos para el diseño de viga que soporta la carga-500kg

Apéndice H. Baterías de calefacción

Apéndice I. Nebulizadores FLF

Apéndice J. Cotizaciones

Apéndice K. Cotización Palau & Soler

Apéndice L. Cotizaciones varias

Apéndice M. Cotización LYR Control

Resumen

Título: Diseño y construcción de un sistema de producción de forraje de maíz hidropónico.*

Autor: Jhoan Sebastián Murillo Possos, Jaime Andrey Rodríguez Fernández**

Palabras Clave: Hidroponía, Agroindustria, Ganadería, Automatización, Forraje verde hidropónico FVH.

Descripción: En la agroindustria colombiana existen oportunidades de mejora que pueden ser tomadas por la academia para revisar si es posible hallar una solución viable. En este trabajo de investigación, se tomó como objetivo el diseño, prototipado y revisión de la viabilidad técnico-económica de un sistema de producción de forraje de maíz hidropónico en capacidad de hacer las veces de suplemento dietario en dietas de bovinos. El prototipado y el diseño consistió en el desarrollo de algoritmos de automatización y cálculos usando principios ingenieriles de mecánica de sólidos y mecánica de fluidos con el ánimo de modelar un sistema en capacidades óptimas de producción y que cumpliera con las necesidades que tiene el cultivo que han sido descritas y cuantificadas previamente en trabajos enfocados al proceso biológico.

Por último, pero no menos importante, se estudia la viabilidad técnico-económica en la que se toma de referencia trabajos de investigación previos publicados por la FAO, en la que el proceso alimentación de bovinos denota igualdad de condiciones cuando se implementa en un 50% dentro de la dieta como suplemento. Para un sistema en capacidad de producir 500Kg por día que técnicamente estaría en condiciones de aportar a una dieta en la que hace falta el uso de 1000 kg de suplemento dietario o sal mineralizada, se encuentra un tiempo de retorno de inversión de aproximadamente medio año, ofreciendo una buena oportunidad de negocio para quienes están en planes de hacer movimientos rápidos de capital con la transición entre la ganadería extensiva tradicional y la ganadería bajo confinamiento de bovinos. Se concluye que los proyectos que son sostenibles medioambientalmente también están mostrando ser rentables, un panorama alentador.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Dr. Ingeniería química

Abstract

Title: Design and Construction of a Hydroponic Corn Forage Production System.*

Author: Jhoan Sebastián Murillo Possos, Jaime Andrey Rodríguez Fernández.**

Key Words: Hydroponics, Agro-industry, Livestock, Automation, Hydroponic Green Forage (HGF).

Description: In the Colombian agro-industry, there are opportunities for improvement that can be explored by academia to determine if a viable solution is possible. In this research work, the objective was to design, prototype, and assess the technical-economic feasibility of a hydroponic corn forage production system capable of serving as a dietary supplement in cattle diets. The prototyping and design involved the development of automation algorithms and calculations using engineering principles of solid mechanics and fluid mechanics to model a system with optimal production capacities that meet the previously described and quantified needs of the crop in biological process-focused works.

Lastly, but not least, the technical-economic feasibility is studied, referencing previous research published by the FAO, where the cattle feeding process shows equal conditions when implemented at 50% in the diet as a supplement. For a system capable of producing 500 kg per day, which technically would contribute to a diet requiring the use of 1000 kg of dietary supplement or mineralized salt, an investment payback time of approximately six months is found, offering a good business opportunity for those planning swift capital movements in the transition from traditional extensive cattle farming to confined cattle farming. It is concluded that environmentally sustainable projects are also proving to be profitable, presenting an encouraging outlook.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Dr. Ingeniería química

Introducción

En Colombia, la carne bovina y los lácteos son alimentos básicos (García Mahecha, 2023), generadores de empleo y fuente de ingresos. La cadena de producción de estos productos abarca desde la crianza hasta la venta, incorporando aspectos cruciales como el beneficio y transporte. Cada segmento ofrece oportunidades de mejora para optimizar la eficiencia y sostenibilidad de la producción.

Este trabajo se centra en la alimentación de bovinos, específicamente en la suplementación de deficiencias nutricionales presentes en los pastizales y forrajes nacionales. Se plantea llevar a cabo un estudio técnico-económico para evaluar la viabilidad de la producción de forraje verde hidropónico como suplemento dietario para rumiantes. La producción de forraje verde hidropónico es una alternativa viable para la suplementación nutricional de bovinos. Este sistema de producción se caracteriza por su alta productividad y eficiencia, así como por su bajo impacto ambiental.

Los resultados de este estudio podrían contribuir a la optimización de la cadena de producción de carne bovina y lácteos en Colombia, así como a la reducción de los desafíos ambientales asociados con la alimentación del ganado.

1. Planteamiento del Problema

La ganadería extensiva es una práctica tradicional que consiste en imitar los ecosistemas naturales. En Colombia, es el método estándar, pero tiene implicaciones ambientales y económicas importantes. La ganadería extensiva causa deforestación (Rico, 2017), disminución de la productividad del suelo y pérdida de biodiversidad. Además, es susceptible a las condiciones climáticas. La ganadería intensiva es una práctica que se caracteriza por la cría de animales en un entorno artificial y confinado (Westreicher, 2020). La producción de forraje hidropónico es una técnica intensiva que permite producir alimento en un espacio reducido y controlado, independientemente de las condiciones ambientales.

Figura 1

Forraje verde hidropónico



Nota. Tomado de Sánchez, W. (13 de Marzo de 2018). *ABCRURAL PARAGUAY - Forraje Hidropónico.*

[Video]. https://www.youtube.com/watch?v=_AwdkuSzGeQ&t=288s

Este proyecto busca diseñar y prototipar un contenedor de producción de forraje

hidropónico de maíz para ser utilizado en Bucaramanga. El contenedor debe ser capaz de producir 500 kg de forraje hidropónico diarios.

2. Justificación

La ganadería es una actividad importante en Colombia, pero la producción tradicional es insostenible. La hidroponía es una alternativa eficiente que permite producir forraje sin deforestación, mejorando la calidad nutricional del alimento y reduciendo los costos (French & Karen, 2014). El desarrollo de un sistema de producción de forraje hidropónico es necesario para generar una industria cárnica y lechera competitiva y sostenible, como la de países más desarrollados, Figura 2. A largo plazo, esta tecnología también podría generar empleo en comunidades campesinas.

Figura 2

Alimentación de bovinos mediante FVH



Nota. Tomado de AGRITOM. (10 de 12 de 2022). [Imagen adjunta]. [Actualización de estado]. Instagram. https://www.instagram.com/p/Cal5dH_IoaU/

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema para la producción de forraje verde hidropónico de maíz para ser implementado en la industria ganadera, cumpliendo con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica hacia la conservación de los recursos naturales, el uso racional de la energía y el fomento del espíritu emprendedor.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de producción de forraje verde hidropónico automatizado que contemple las siguientes especificaciones:
 - Producir forraje de maíz.
 - Capacidad de producción entre 500 a 550 kg de forraje por día.
 - Sistema de iluminación con el espectro óptimo para la producción de biomasa.
 - Sistema de fertirrigación por aspersión.
 - Estructura para soporte de los elementos que los conforman.
- Construir un prototipo funcional para la experimentación y evaluación del sistema.
- Evaluar la viabilidad técnico-económica de la implementación del sistema.

4. Revisión de Literatura

4.1 Estado del Arte

- Oviedo y Sandoval (2019). Evaluación de los efectos de la inclusión de Forraje Verde Hidropónico de Maíz en las etapas de levante y ceba en conejos macho de la raza Nueva Zelanda. MÁLAGA: Universidad Industrial de Santander. Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Programa de Zootecnia. (p.61); Se realizó un estudio para evaluar la capacidad nutricional del FVH. Conejos alimentados con distintas concentraciones de FVH mostraron un crecimiento similar al de conejos alimentados con concentrado.
- Contreras, et al (2018). Valorización económico nutricional como criterio de selección de especies para la producción de Forraje Verde Hidropónico (FVH). COQUIMBO, CHILE. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS - INFORMATIVO N° 79. (p.49); El forraje para ganado debe ser nutritivo, asequible y accesible. En este informe, se compararon distintas especies de semillas para forraje en un sistema controlado. El maíz resultó ser la mejor opción, ya que ofrece un buen valor nutricional a un costo razonable.
- Bedolla-Torres, et al. (2015), la irrigación con levaduras incrementa el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de maíz. REVISTA ARGENTINA DE MICROBIOLOGÍA, 9 de septiembre de (2015, p.9); Para lograr un máximo contenido nutricional en el forraje verde hidropónico de maíz, se debe realizar la pre-germinación de las semillas en una solución de hipoclorito al 1%. La germinación se debe realizar con agua a un pH de 5.5 a 7, una conductividad eléctrica (CE) de 1.0 mS/cm y una temperatura de 25 a 28°C. Estas son las especificaciones técnicas descritas para este trabajo.

- (FAO, 2006). Este manual aborda 4 temas: El FVH como tecnología para pequeños productores; Métodos y factores de producción; Resultados en la alimentación; Costos e impacto económico. Es una guía completa sobre el proceso, las especificaciones técnicas y los costos.
- Espectro de luz y crecimiento de plantas. (2018). California Lightworks Argentina; Los LEDs han permitido estudiar el efecto de las distintas longitudes de onda de la luz en el crecimiento de las plantas. Las plantas prefieren el espectro azul y rojo para la fotosíntesis y el desarrollo.
- . López, et al. (2009). El forraje verde hidropónico (FVH): Una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia*, 34(2), 121-126. de [Redalyc](#) .El forraje verde hidropónico (FVH): una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas; Se evaluaron tres densidades de siembra de FVH de maíz. La densidad de 2,5 kg/m² produjo los mayores rendimientos, pero la densidad de 2,0 kg/m² tuvo la mejor conversión de semilla a FVH. Los rendimientos de FVH fueron similares a los de las principales especies forrajeras, pero en una superficie 100 veces menor, sin agroquímicos y utilizando 30-50 veces menos agua.
- FAO (2003). *La Huerta Hidropónica Popular*. Santiago, Chile. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. (p.132); La hidroponía es una alternativa económica a la producción agrícola tradicional. Permite cultivar plantas sin suelo, en un sistema vertical. Este manual técnico describe los diferentes tipos de hidroponía y las pautas técnicas para su implementación.

4.2 Marco conceptual

La producción de alimentos sostenible y eficiente es un reto importante para la humanidad. Los sistemas de producción intensivos, como los feedlots, permiten optimizar el uso del espacio y la mano de obra, así como acelerar la ganancia de peso del ganado.

Figura 3

Campos de pastoreo durante la estación seca (verano)



El forraje verde hidropónico es una alternativa a las sales minerales con elevada concentración de suplementos. Este alimento es capaz de compensar la desnutrición del suelo causada por excesos de acidez o escasez de agua, Figura 3. Sin embargo, es importante seguir las recomendaciones de la FAO y no sobre calificar el alimento, ya que es necesario el correcto balance de una dieta con alimentos que aporten materia seca.

4.2.1 Hidroponía

Conjuntos de técnicas utilizadas para cultivo de plantas sin el uso de tierra, a la que se le aplica una solución de nutrientes que pueden ser estática o circulante que contiene la cantidad de elementos necesarios para el crecimiento y sostenimiento de la planta (FAO, 2003).

4.2.2 Forraje verde hidropónico (FVH)

Técnica para producir forraje de alta calidad para animales. Consiste en germinar granos (cereales o leguminosas) en condiciones controladas (temperatura, humedad y luz).

4.2.3 Proceso de Producción de FVH. Para producir FVH se deben considerar las siguientes etapas (FAO, 2001):

- **Selección de especie:** Se recomienda maíz o sorgo para climas cálidos y avena o trigo para climas fríos. (Contexto Ganadero, 2016)
- **Selección de semilla:** Se deben evitar semillas partidas o con residuos.
- **Lavado de semillas:** Se usa hipoclorito de sodio para desinfectar.
- **Pre-germinación:** Se sumergen las semillas en agua durante 24 horas.
- **Siembra:** Las semillas pregerminadas, se siembran en bandejas de PVC o poliestireno.
- **Germinación:** Se mantienen condiciones de baja luminosidad, pH de 5.5 a 7, CE de 1.0 mS
- **Producción:** empieza el fertirriego con la solución nutritiva; la cual consiste en la preparación y almacenamiento de dos soluciones que son mezcladas en la tubería poco antes de ser esparcidas sobre el cultivo. Además, la iluminación óptima es de 14 horas por día con 1500 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ de radiación hasta la cosecha, esta etapa es de 6 días y si se mantienen condiciones de humedad relativa de 90% y temperatura entre 25°C y 28°C durante todo el proceso se pueden esperar resultados de 8 a 10kg de FVH por cada kg de semilla

4.2.4 Factores que Influyen en la Optimización de la Producción

Los factores que influyen en la optimización de la producción de FVH son, según (FAO, 2001):

- **Densidad de siembra:** es un factor muy importante ya que debido a este se garantiza la germinación de la mayor cantidad de semillas y también permite que estas tengan estabilidad a manera que estas van creciendo, según el manual de la FAO las densidades de siembras más adecuadas son de 1.9 a 3.4 kg/m^2

- **Solución nutritiva:** Es una mezcla de agua y compuestos químicos que las plantas necesitan para crecer. La composición de la solución depende de la planta, su ubicación y etapa de crecimiento. Se puede determinar la composición de la solución mediante análisis fisicoquímico del agua o mediante pruebas en un cultivo.
- **Contenedor:** Es una estructura que protege el forraje de los factores externos y alberga los demás componentes del sistema. Los contenedores actuales limitan la movilidad del sistema. Los invernaderos, contenedores de carga y construcciones de madera o concreto son algunos tipos de contenedores.

Figura 4

Modelo del sistema presente en el mercado



Nota. Tomado de Qingzhou Rainbow Modern Agriculture Development Co., Ltd. (2021). *Granja invernadero contenedor hierba hidropónica.* ALIBABA. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Hydroponic-1600487290781.html?spm=a2700.picsearch.offer-list.14.78965f93qh1GuR>

- **Estructura interna:** Bastidor donde se colocan las bandejas y al cual van acoplados los demás sistemas de regulación del proceso.
- **Transporte del fertirriego:** Sistema de bombeo que se encarga de almacenar y distribuir

la solución de riego a las bandejas de crecimiento.

- **Sistema de control:** regula las condiciones ambientales del cultivo, incluyendo temperatura, humedad, calidad de la solución nutritiva y riego. Utiliza sensores para medir las variables y un controlador para ajustar los actuadores, como bombas y ventiladores, para mantener las condiciones óptimas.

- **Iluminación:** Si La fotosíntesis es un proceso esencial para el crecimiento de las plantas. Requiere luz, agua y dióxido de carbono. La luz proporciona la energía necesaria para combinar las moléculas de agua y dióxido de carbono para formar glucosa. La clorofila es el pigmento que absorbe la luz y permite que ocurra la fotosíntesis. La radiación fotosintéticamente activa (PAR) es la luz que las plantas pueden utilizar para la fotosíntesis. Tiene una longitud de onda de entre 400 y 700 nm (Benegas & Maria , 2014).

La luz roja (640nm - 680nm) es esencial para el proceso de floración y fructificación de las plantas. Según (California Lightworks Argentina, 2020) actúa como un punto crítico de absorción para las hojas, donde el fitocromo, un fotorreceptor sensible a la luz roja, desencadena respuestas importantes. La luz roja regula el florecimiento, la producción de frutos y estimula el crecimiento del tallo, la ramificación y el aumento del diámetro del tallo.

4.3 Marco legal

En la construcción de sistemas de producción de forraje verde hidropónico (FVH) se deben cumplir con las normativas gubernamentales.

Vertimientos de agua: Según la resolución 0883 de 2018 del decreto 1076 en el artículo 5 la temperatura máxima permitida es de 40 °C y la diferencia de temperatura en la zona de mezclado debe ser menor a 4 °C Figura 5.

Decreto 1840 de 1994: El ámbito de aplicación del decreto cubre todas las especies animales, vegetales y sus productos, así como los insumos agropecuarios. El decreto tiene como objetivo la prevención, control, erradicación y manejo de enfermedades, plagas, malezas y otros organismos dañinos (Decreto 1840, 1994).

Resolución 061252 de 2020: Los alimentos que se producen para autoconsumo están exentos de registro (Instituto Colombiano Agropecuario, Resolución 61252, 2020).

Figura 5

Límites aceptables para propiedades fisicoquímicas en vertidos de aguas residuales de la agroindustria

PARÁMETRO	UNIDADES	AGROINDUSTRIA	GANADERIA	ACUICULTURA
Generales				
pH	Unidades de pH	6.00 a 9.00	6.00 a 9.00	6.00 a 9.00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	100.0	100.0	100.0
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	75.0	75.0	75.0
Sólidos Suspensivos Totales (SST)	mg/L	75.0	75.0	100.0
Sólidos Suspensivos Filtrados (SSF)	mg/L	1.0	1.0	1.0
Sólidos y Azúcares	mg/L	10.00	10.00	10.00
Compuestos Volátiles Fenólicos	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Agua de Mielares (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
 Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	1.0	1.0	
Compuestos de Fósforo				
Fósforo Total (PT)	mg/L	1.0	1.0	Análisis y Reporte
Fósforo Total (PT)	mg/L	2.0	2.0	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitrato (N-NO ₃)	mg/L	1.0	1.0	Análisis y Reporte
Nitrato (N-NO ₃)	mg/L	0.5	0.5	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₄)	mg/L	1.0	0.5	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (NT)	mg/L	15.0	15.0	Análisis y Reporte
Índice				
Índice Total (ICT)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Sulfuro (S ²⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Metales y Metaloides				
Cinc (Zn)	mg/L	3.0	3.0	
Cobalto (Co)	mg/L	1.0	1.0	
Cromo (Cr)	mg/L	0.3	0.3	
Fierro (Fe)	mg/L	1.7	1.7	
Manganeso (Mn)	mg/L	1.7	1.7	
Níquel (Ni)	mg/L	0.4	0.4	
Plata (Ag)	mg/L	0.03	0.03	
Plomo (Pb)	mg/L	0.1	0.1	
Otros Parámetros para Análisis y Reporte				
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	

Nota. Tomado de Resolución 0883 de 2018 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Normativa legal colombiana. (2018). <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0883-de-2018/#:~:text=Resoluci%C3%B3n%200883%20de%202018%20Ver%20documento%20Mayo%2018,de%20aguas%20marinas%2C%20y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones%C2%BB>

5. Diseño conceptual

5.1 Despliegue de la Función Calidad

5.1.2 *Requerimientos del Consumidor*

- Durabilidad: Se espera que mantenga sus condiciones óptimas de trabajo con labores de mantenimiento y aseo rutinarias.
- Nutrientes al máximo: El FVH debe contener buena cantidad de nutrientes para cumplir con su objetivo de suplir necesidades dietarias.
- Velocidad de producción: Tiempo de producción de forraje entre 9 a 14 días.
- Fácil limpieza: Para asegurar su duración.
- Autonomía: Automatización para la mayoría de las tareas.
- Fácil manejo: Inclusión de operarios con bajo nivel de escolaridad.
- Fácil cosecha: Sacar las bandejas y cosechar debería ser todo lo necesario.
- Capacidad de Producción: Debe producir la cantidad objetivo de 500 kg.
- Economía: Sin olvidar la fiabilidad no se deben exceder los gastos de inversión.
- Funcionalidad: El sistema debe ser capaz de trabajar como fue propuesto.

5.1.3 *Organización de Requerimientos*

Los requerimientos se organizan por orden de importancia así:

- Economía
- Funcionalidad
- Velocidad de producción

- Durabilidad
- Capacidad de producción
- Fácil manejo
- Nutrientes al máximo
- Autonomía
- Fácil limpieza
- Fácil cosecha

5.2 Matriz de Calidad

Figura 6

Matriz de Calidad para el sistema de producción de FVH

Requerimientos Del Cliente	Prioridad	Parámetros del proyecto																	
		Rutinas de mantenimiento		Capacitación del talento humano		Estructura de soporte		Sistema para preparar fertirriego		Diseño compacto		Sistema de Aspersión		Sistema de acondicionamiento del aire		Sistema de iluminación		Sistema de control de lazo cerrado	
1 Economía	13	3	39	1	13	3	39	9	117	9	117	9	117	9	117	9	117	9	117
2 Funcionalidad	12	1	12	1	12	3	36	9	108	3	36	3	36	3	36	3	36	3	36
3 Velocidad de producción	12	3	36	9	108	1	12	3	36	0	0	3	36	9	108	9	108	9	108
4 Durabilidad	10	9	90	3	30	9	90	1	10	3	30	3	30	3	30	3	30	3	30
5 Capacidad de producción	9	9	81	3	27	1	9	1	9	9	81	3	27	9	81	9	81	9	81
6 Fácil Manejo	8	3	24	3	24	1	8	3	24	1	8	9	72	1	8	1	8	9	72
7 Nutrientes al máximo	8	9	72	1	8	1	8	9	72	1	8	9	72	3	24	9	72	9	72
8 Autonomía	7	3	21	1	7	1	7	9	63	1	7	9	63	3	21	3	21	9	63
9 Fácil limpieza	5	3	15	3	15	3	15	0	0	1	5	3	15	1	5	1	5	3	15
10 Fácil Cosecha	5	1	5	3	15	3	15	0	0	9	45	0	0	0	0	0	0	1	5
Totales		395		259		239		439		337		468		430		478		599	
								22,13%				23,59%				24,09%		30,19%	

5.3 Planteamiento de Alternativa

En la Tabla 1 se resumen las alternativas y sus respectivas configuraciones técnicas respecto a los subsistemas de importancia para evaluar (ELEUSIS Internacional S.A.S.).

Tabla 1

Características de configuraciones técnicas de alternativas

Subsistema Alternativa	Control (temperatura y humedad)	Iluminación	Transporte del fertirriego	Preparar fertirriego
1 invernadero	Lazo abierto	Natural	Bombeo sin temporización	Manual
2 contenedor con Paredes Translucidas	Lazo cerrado	Artificial y natural	Bombeo con temporización	Manual
3 contenedor o Construcción Totalmente Aislado.	Lazo cerrado	Natural	Bombeo con temporización	Automatizado

5.4 Evaluación de Alternativas

Tabla 2

Evaluación de las alternativas según los parámetros seleccionados

	Parámetros ganadores	Prioridad	ALTERNATIVAS					
			1	2	3			
1	Sistema de control	0,31	3	0,93	4,8	1,488	5	1,55
2	Sistema de Iluminación	0,24	4,8	1,15	4,8	1,152	4	0,96
3	Sistema de transporte para el fertirriego	0,23	3,8	0,87	4	0,92	5	1,15
4	Sistema para preparar fertirriego	0,22	3	0,66	3,8	0,836	4,5	0,99
				3,616		4,396		4,65

5.5 Especificación de Alternativa Ganadora

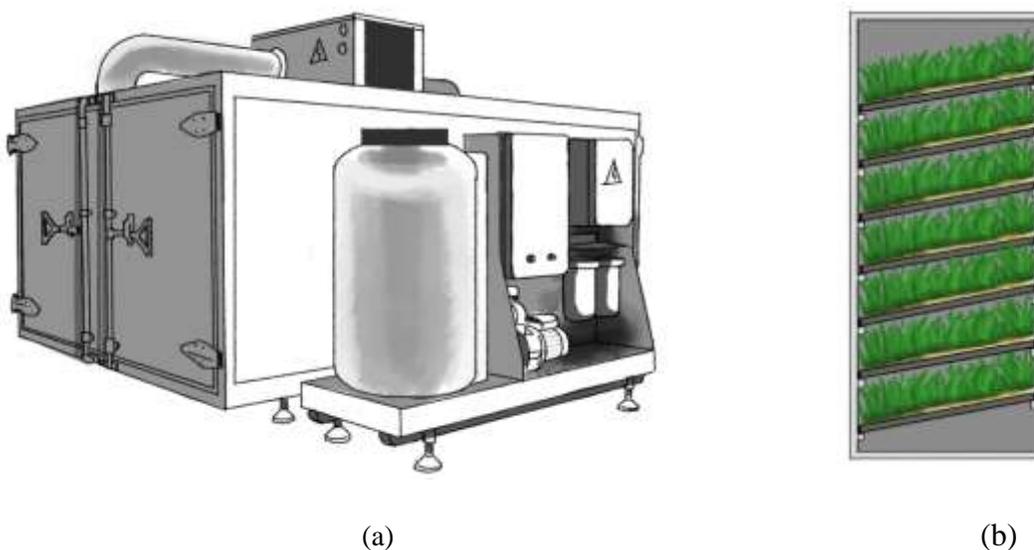
Después de hacer la evaluación de alternativas se concluye que un contenedor o

construcción totalmente aislado es la mejor solución al problema, con un esquemático mostrado en la Figura 7. Todo bajo las siguientes especificaciones:

1. **Estructura:** deberá acomodarse a un contenedor estándar. La estructura vertical de la estantería acomodará las bandejas de producción. El PVC y poliestireno son los materiales más recomendados para las bandejas FVH por su durabilidad y fácil aseo.
2. **Sistema de acondicionamiento de aire:** el espacio se debe mantener en un rango de 25°C a 28°C con una humedad relativa del 90%, esto durante las dos etapas.

Figura 7

Esquema del contenedor propuesto en la alternativa ganadora



Nota. (a) Vista ortogonal del exterior. (b) vista lateral de la disposición de las bandejas en el interior.

3. **Sistema de iluminación:** El forraje requiere diferentes espectros de luz según su etapa de crecimiento. Para germinar, necesita oscuridad. Para la producción, se usan bombillas

fluorescentes con longitudes de onda dentro del espectro PAR durante no más de 14 horas /día.

4. **El sistema de fertirriego:** El sistema de fertirriego es esencial para el cultivo. El pH de la solución nutritiva debe ser de 5.5 a 7 en la germinación y de 1.5 a 2.0 mS/cm en la etapa final. El sistema más común utiliza tuberías de PVC y aspersores. Las bombas centrífugas son la mejor opción para bombear la solución nutritiva. La preparación de la solución nutritiva es importante y debe ser precisa. Los químicos generalmente están en polvo y se dosifican con electroválvulas.

5. **Sistema de control:** este deberá ser de lazo cerrado para asegurar que la mayoría de las tareas sean automatizadas, un sistema de control de lazo cerrado se conforma de un controlador, encargado de leer y acondicionar las señales de los sensores, quienes toman la información del sistema, si los valores no son los deseados se procede a activar un actuador y así mantener los valores óptimos deseados.

6. Diseño y construcción del prototipo

6.1 Diseño Conceptual de los Subsistemas

Se describen las alternativas seleccionadas para los diferentes subsistemas.

6.1.1 Estructura

El cultivo va a estar distribuido dentro de un contenedor comercial, debe garantizar por lo mínimo los siguientes requerimientos:

Área de cultivo: área necesaria de cultivo de FVH que garantice la producción de FVH requerido por día.

Higiene: condiciones adecuadas para producción de FVH y evitar la proliferación de

insectos y bacterias.

Fácil cosecha: la cosecha no es nada más que la distribución del maíz dentro de las bandejas y la remoción de la capa de FVH que se crea en ellas.

Costo de fabricación: que sea lo más económico posible y que a largo plazo la inversión se vea compensada en comparación con el gasto que implicaba la producción de pasto tradicional.

Durabilidad: ya que la adquisición del sistema supone una buena inversión económica, se espera que este mantenga sus condiciones óptimas de trabajo por un tiempo mínimo de 5 años.

Fácil limpieza: como parte del mantenimiento para asegurar su durabilidad.

En la Tabla 3 se ilustra la selección de las características técnicas para tener en cuenta que son descritas en la Tabla 4 para finalmente dar calificación y seleccionar en la

Tabla 5.

Tabla 3

Función de calidad para subsistema de estructura en prototipo

Requerimientos	Ingeniería											
	Importancia		Rutinas de mantenimiento		Economía		Salubridad		Dimensiones		Montaje	
Área de cultivo	6	1	6	3	18	0	0	9	54	9	54	
Higiene	5	1	5	3	15	9	45	1	5	0	0	
Fácil cosecha	4	1	4	1	4	3	12	3	12	3	12	
Costo de fabricación	3	3	9	9	27	3	9	9	27	9	27	
Durabilidad	2	9	18	9	18	9	18	3	6	3	6	
Fácil limpieza	1	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
Total			45		85		87		107		99	
							29,7%		36,5%		33,8%	

Tabla 4*Caracterización de alternativas de materiales para la estructura*

Alternativa	Característica	Dimensiones (Área de cultivo)	Montaje (Actividad de armado y desarmado)	Salubridad
1. Estructura de madera pintada		Las necesarias para el cultivo	Fácil de ejecutar	Fácil propagación de hongos y bacterias
2. Estructura en acero con pintura anticorrosiva		Las necesarias para el cultivo	Fácil de ejecutar	Difícil propagación de hongos y bacterias

Tabla 5*Selección de alternativas para el subsistema Estructura*

Parámetros ganadores	Prioridad	Alternativas			
		Madera		Acero inoxidable	
Dimensiones	0,365	3	1,1	4	1,46
Montaje	0,338	2	0,68	4	1,35
Salubridad	0,297	2	0,59	5	1,48
Total			2,365		4,297

La estructura vertical de acero inoxidable tendrá tres filas de bandejas que se ubicarán a lo largo del contenedor. Estas bandejas podrán deslizarse para garantizar que una zona del sistema se use para el cultivo, mientras que otra se empleará para la recolección del FVH. Esto permitirá una mayor área de cultivo. Además, el contenedor tendrá dos puertas: una para realizar y tener acceso al cultivo y otra para la recolección de este.

6.1.2 Sistema de Acondicionamiento de Aire Su función es suministrar la potencia necesaria para calentar el aire, y garantizar que la temperatura se mantenga adecuada. Estos aspectos son especialmente importantes para lograr una eficiencia fotosintética óptima en el sistema.

- **Economía de funcionamiento:** minimizar consumo energético y coste de mantenimiento.
- **Alimentación de energía:** la alimentación principal sea energía eléctrica.
- **Longevidad:** larga vida útil según las condiciones a las que se somete el sistema.
- **Fácil manejo:** fácil acceso para personas con bajo nivel de escolaridad.
- **Autonomía:** automatizado para casi todas las labores.
- **Costos:** el costo de fabricación sea lo más bajo posible.

En las siguientes tres tablas se repite el proceso de selección de alternativas:

Tabla 6

Función de calidad para el subsistema de calefacción

Requerimientos	Ingeniería													
	Importancia		Temperatura		Control		Aeración		Dimensiones		Economía		Mantenimiento	
Autonomía	5	9	45	9	45	0	0	0	0	9	45	3	15	
Alimentación de energía	4	9	36	9	36	9	36	0	0	3	12	3	12	
Economía de funcionamiento	3	9	27	9	27	9	27	3	9	9	27	9	27	
Costos	2	3	6	3	6	3	6	9	18	9	18	9	18	
Longevidad	1	0	0	3	3	0	0	3	3	9	9	9	9	
Total			114			117			69			30	111	81
			33,33%			34,21%						32,5%		

Tabla 7*Características técnicas de las alternativas de calefacción*

Característica Alternativa	transferencia de calor (convección)	sistema de control	economía (ejecución de mantenimiento)
1. Piso radiante	Natural	Lazo abierto	Mayor
2. Baterías eléctricas	Forzada	Lazo cerrado	Menor

Tabla 8*Selección de alternativas subsistema de calefacción*

Parámetros ganadores	Prioridad	Alternativas			
		Baterías eléctricas		Piso radiante	
Control	0,342	5	1,711	3	1,026
Temperatura	0,333	4	1,333	2	0,667
Economía	0,325	3	0,973	2	0,649
Total		4,018		2,342	

- **Especificación de alternativa ganadora:** el sistema de calefacción consta de baterías calefactoras y ventiladores. Los ventiladores proporcionan ventilación forzada y un ventilador adicional ayuda lograr temperatura uniforme.

6.1.3 Sistema de Iluminación

Los paneles se distribuirán estratégicamente para garantizar que las plantas reciban la iluminación adecuada. Se debe garantizar un periodo de iluminación de 12 horas al día.

6.1.4 Sistema de Fertirriego

Debe transportar la solución nutritiva a una tasa de 1,5 litros por metro cuadrado por día, a través de un sistema de mangueras. El área de aspersión debe ser de 0,14 metros cuadrados. El pH

se controla dosificando soluciones salinas o alcalinas. La recirculación de la solución es un método de ahorro de recursos. El control de nutrientes permite que la solución sea adecuada para el desarrollo de las plántulas.

- **Selección de Alternativas:** bajo los requerimientos se lleva a cabo la selección:
- **Despliegue de la función de calidad:** los requerimientos se listan a continuación:

Completa cobertura del área: el área es pequeña en el prototipo.

Económico de adquisición: basado en la fiabilidad del diseño y material de construcción.

Tamaño de gota: la cobertura del chorro sobre la superficie unitaria de las hojas que componen el forraje. es de relación con la cobertura de dicha superficie.

Aprovechamiento de la solución: por vías radicular y foliar.

Economía de funcionamiento: se precisa de un dispositivo que requiera la mínima presión de accionamiento, en función de su agujero de salida y la necesidad de área a cubrir.

Prevenir arrastre de semilla: la energía liberada por el chorro no debe ser capaz de hacer arrastre de partículas con las semillas, al menos durante los primeros días de cultivo.

Geometría de chorro: cumplimiento del alcance y altura para su completo desarrollo.

En las siguientes tres tablas se revisan cuáles son las características para tener en cuenta, se resumen para cada alternativa y se hace la selección respectivamente.

Figura 8*Función de calidad para el subsistema de bombeo*

Requerimientos	Prioridad	Parámetros de seleccion: Tipo de riego a usar									
		Altura recomenda		Instalacion sencilla		Caudal de salida		Area de cobertura		Rutinas de mantenimiento	
1 Prevenir arrastre de semillas	7	3	21	3	21	9	63	9	63	9	63
2 Completa cobertura de area	6	3	18	3	36	3	18	3	18	0	0
3 Adquisicion economica	5	3	15	1	12	9	45	9	45	1	5
4 Aprovechamiento de la solucion	4	9	36	9	90	3	12	3	12	3	12
5 Funcionamiento economico	3	3	9	1	9	9	27	9	27	1	3
6 Geometria de chorro	2	9	18	0	0	0	0	9	18	0	0
7 Tamaño de gota	1	3	3	1	8	1	1	9	9	9	9
Totales		395		239		478		599		92	
		21,91%				26,51%		33,22%			

Tabla 9*Características alternativas difusión de fertirriego*

Alternativa	Característica	Caudal permisible	Aprovechamiento según dispersión y tamaño de gota	Altura recomendada
1 riego por goteo		0.33gotas/minuto	Radicular	A la altura de la raíz
2 riego con aspersores		29lt/h@2bar	Radicular	75cm
3 riego con nebulizadores		2lt/h	Radicular y foliar	10 m

- **Evaluación de alternativas:**

Figura 9

Selección de alternativas para el subsistema de bombeo

Parámetros ganadores	Prioridad	ALTERNATIVAS					
		GOTEO		ASPERSION		NEBULIZACION	
1 Area dde cobertura	0,2683	3,00	0,80	4,80	1,29	5,00	1,34
2 Caudal de salida	0,3247	4,80	1,56	4,80	1,56	4,00	1,30
3 Altura recomendada	0,4069	3,80	1,55	4,00	1,63	5,00	2,03
		3,91		4,47		4,67	

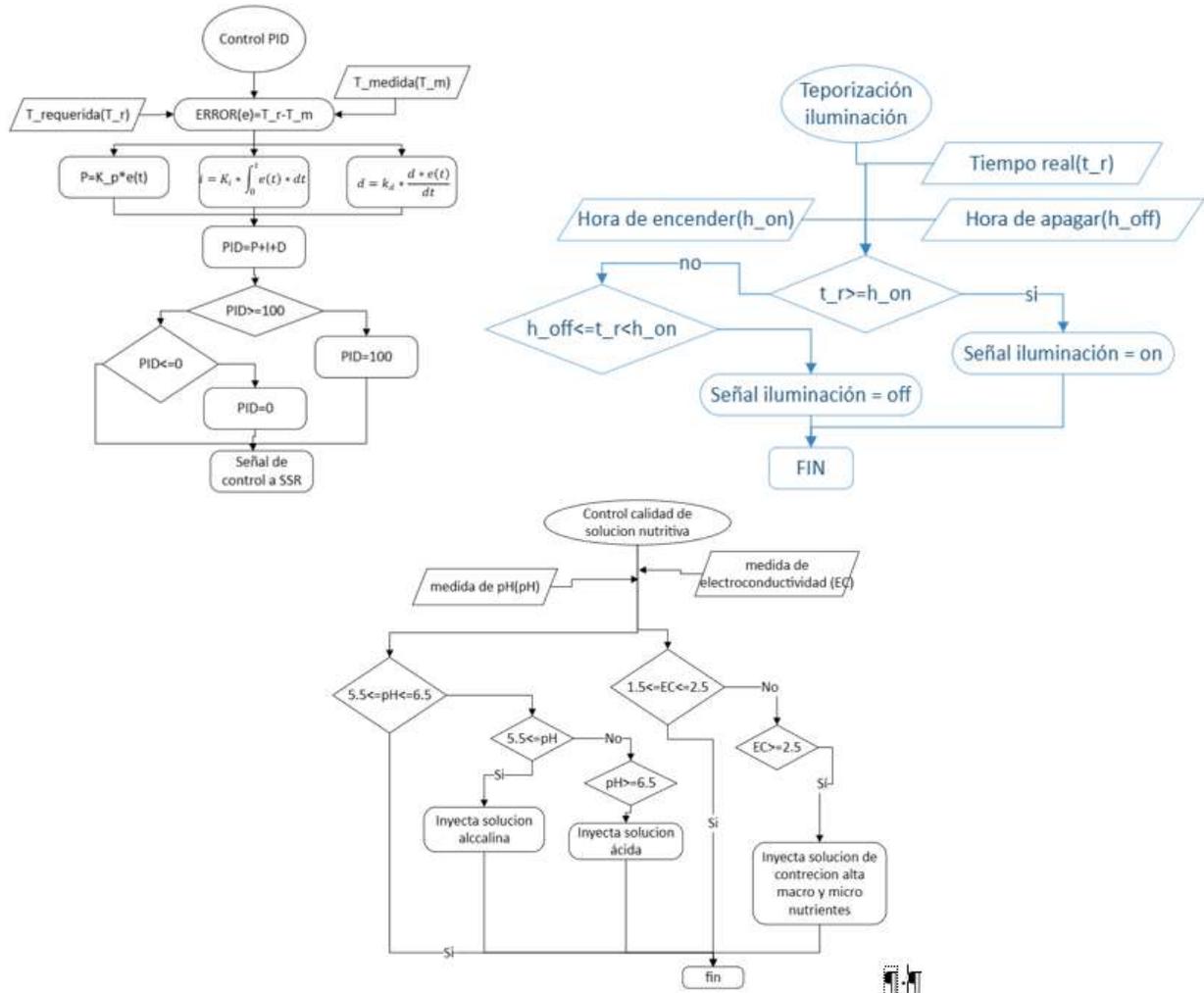
Especificación de la alternativa ganadora: Los nebulizadores son dispositivos diseñados para hacer pasar un flujo de caudal constante por un agujero luego por una geometría de expansión, para tener uniformidad de difusión.

6.1.5 Sistema de control

Los algoritmos de arquitectura de control se describen en los diagramas de flujo contenidos en la Figura 10:

Figura 10

Flujogramas para sistema de control



Nota. A. control PID temperatura; B. Temporización de iluminación; C. Control de nutrientes y PH

6.2 Diseño en Detalle del Prototipo

Tabla 10

Proyección de la producción

Descripción	Valor
Kilogramos de FVH producidos en la cosecha	$Kg_{producidos} = 2$ [kgFVH]
Rendimiento del cultivo	$R = 8$ [kg FVH/ kg de semilla]
Densidad de siembra	$\rho_{sim} = 1.9$ [kgsemilla/m ²]

6.2.1 Estructura

Se hace necesario el cálculo del área del cultivo, con los datos contenidos en la Tabla 10, establecidos para el objetivo, Estos se ingresan al procedimiento mostrado en el Apéndice B. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11

Cálculo de área de cultivo

Descripción	Valor
Kilogramos de semillas a cultivar.	$Kg_{sem} = 0.2$ [kg de semilla]
Kilogramos de semillas para cultivar necesarios en el cultivo con sobreproducción.	$Kg_{sem-s} = 0.25$ [kg de semilla]
Área de cultivo	$A_{cultivo} = 0.14$ [m ²]

6.2.1.1 Selección de Bandejas. Se desarrolló una selección de acuerdo con la necesidad del área del cultivo y se elige una bandeja de 27 cm x 54 cm x 5 cm. Se muestra en el Apéndice C.

$$A_{bandeja} = L_{bandeja} * Anc_{bandeja} \quad (1)$$

Tabla 12*Dimensiones del área de siembra*

Descripción	Valor
Largo de la bandeja.	$L_{bandeja} = 54$ [cm]
Ancho de la bandeja.	$ANC_{bandeja} = 27$ [cm]
Área de la bandeja.	$A_{bandeja} = 0.14$ [m ²]

Tabla 13*Área de cultivo en prototipo*

Descripción	Valor
Área de cultivo	$A_{cultivo} = 0.14$ [m ²]
Kilogramos de semillas para cultivar necesarios en el cultivo con sobreproducción.	$Kg_{sem-s} = 0.28$ [kg de semilla]
Kilogramos de FVH producidos en la cosecha	$Kg_{producidos} = 2.24$ [kgFVH]

Seguido, se calcula del número de bandejas requeridas como la razón entre el área de cultivo y el área de una bandeja, se necesita 1 bandeja. Ahora se recalcula el peso final de producción teniendo en cuenta el área de cultivo disponible por una bandeja y el procedimiento planteado en el Apéndice B. Este último resultado es listado en la

Tabla 13 como $Kg_{producidos}$.

6.2.1.2 Diseño Viga que Soporta la Carga. El Apéndice D, tiene como contenido el catálogo de Alucol y el procedimiento de cálculo al que se le ingresa el peso final, en la Tabla 14 se resumen los resultados de este análisis estático y de resistencia de materiales, para una carga de 33 [N/m], se selecciona un perfil en aluminio AA6063 T4 angular ALC-A59 del catálogo Alucol.

Tabla 14*Resultados de cálculos de esfuerzos*

Descripción	Valor
Esfuerzo en dirección x	$\sigma_x = 28.84 [MPa]$
Esfuerzo en dirección y	$\sigma_y = 0 [MPa]$
Esfuerzo cortante en xy	$\tau_{xy} = 0 [MPa]$
Esfuerzo cortante máximo	$\tau_{max} = 14.42 [MPa]$
Factor de seguridad de la viga	$N_{viga} = 4.55$
Deformación máxima	$Y_{max} = 1.6 [mm]$

6.2.1.3 Cordón de Soldadura. Se tiene en cuenta el criterio de carga paralela y transversal, (Hamrock et al., 2000), Se selecciona un electrodo E7014 del catálogo Westarco, el Apéndice E contiene el catálogo y el procedimiento matemático para el cálculo del factor de seguridad que da como resultado $N_{sold} = 15.4$. Con lo cual se concluye que la soldadura no falla.

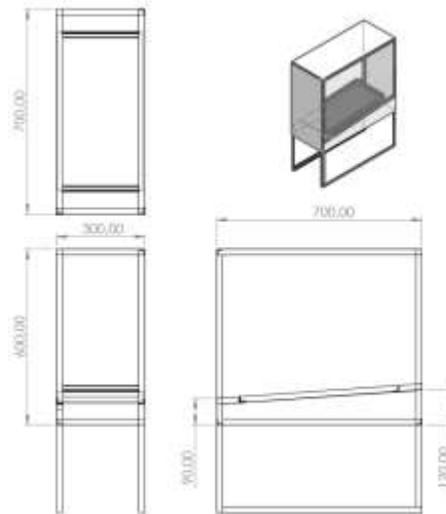
Tabla 15*Dimensiones lámina de PVC*

Descripción	Valor
Dimensión	30x290x.7 cm
Peso	0.9 Kg/m
Coefficiente de conducción	0.12-0.25 w/m ^o k
Temperatura máxima	75 °C

Nota. Tomado de pvcglobalconstructions. (13 de junio de 2020). pvcglobalconstructions.com. *Cielo Raso Pvc.* <https://www.pvcglobalconstructions.com/product/laminas-cielo-raso-pvc/>

Figura 11

Medidas para el dimensionamiento de paredes del prototipo



6.2.1.4 Paredes del Prototipo. Son construidas con láminas de PVC, de dimensiones mostradas en la Tabla 15, por sus propiedades térmicas óptimas para el aislamiento térmico del sistema. Las dimensiones y ubicación de las paredes se presentan en la Figura 11.

6.2.1.5 Calculo Unión de las Paredes y Estructura. El tipo de unión utilizado es la unión adhesiva, ya que se necesita unir dos materiales diferentes y esta opción ofrece una mayor maleabilidad, lo que permite lograr un mejor aislamiento en el sistema. Según el criterio descrito en (Hamrock et al., 2000) el procedimiento de los cálculos desarrollados son contenidos en el Apéndice F, como dato de entrada el esfuerzo a la tracción de la silicona es de 6.8 [Mpa], esto según (David Varón y otros, 2013) los resultados se resumen en la **Tabla 16.**

Tabla 16*Factores de seguridad para juntas entre paredes y estructura*

Sección	$P [N]$	$L [m]$	$\tau_{prom} [pa]$	N_{sil}
Lateral	5,77	1,8	183,53	37049,24
Inferior	6,73	2	192,71	35284,99
Posterior	13,46	2,6	296,48	22935,24

Se observan factores de seguridad muy altos, lo que indica que el sistema tiene baja incertidumbre de falla.

6.2.2 Sistema de Acondicionamiento de Aire

La cámara acondicionada debe mantener una temperatura de 25 a 28°C para que el maíz tenga un buen rendimiento. Se ubicará en Bucaramanga, donde la temperatura promedio es de 19°C. (IDEAM, 2015).

Tabla 17*Temperaturas para el análisis térmico*

Temperatura	Valor
Interior	$T_{\infty i} = 28^{\circ}C$
Exterior	$T_{\infty e} = 19^{\circ}C$

6.2.2.1 Renovación de Aire. El caudal de ventilación necesario para garantizar la respiración adecuada de las plantas es de una a dos veces el volumen de la cámara por minuto:

$$\dot{V} = VxN_{renovaciones} \quad (2)$$

De acuerdo con la Figura 11, las dimensiones de la cámara se corresponden con las especificadas en la Tabla 18. A partir de estas dimensiones, se puede calcular el volumen para este paralelepípedo recto:

Tabla 18

Dimensiones del volumen de aire para acondicionar

Descripción	Valor
Ancho	$a = 30[cm]$
Largo	$b = 70[cm]$
Alto	$h = 60[cm]$

Realizando los cálculos se obtiene:

Tabla 19

Volumen y flujo volumétrico en subsistema de calefacción de prototipo

Descripción	Valor
Volumen	$V = 0.126[m^3]$
Flujo volumétrico	$\dot{V}_r = 0.252[m^3/min]$

El flujo volumétrico mínimo de aire requerido para la cámara es de $\dot{V}_r = 0.252[m^3/min]$ que equivale a $\dot{V}_r = 15.12[m^3/h]$, un ventilador con un flujo volumétrico de $20 [m^3/h]$ es el más idóneo, según el catálogo (GICODA, 2022), se selecciona un ventilador compacto de corriente continua de 12V con dimensiones 38x38x28 [mm]. Con las dimensiones del ventilador se determina la velocidad con la que ingresa el aire a la cámara, como $\dot{V}_r = v * S$:

Tabla 20*Características del ventilador*

Descripción	Valor
Área del flujo del ventilador	$S = 1.13 \times 10^{-3} [m^2]$
Velocidad	$v = 5 [m/s]$

6.2.2.2 Cálculos térmicos. Para conocer cuál es la configuración necesaria para el sistema de calefacción se requieren hacer los cálculos adecuados para cuantificar las pérdidas energéticas en el sistema debido a la diferencia de potencial entre el interior y los alrededores.

6.2.2.3 Pérdida de calor por las paredes. El flujo de calor a través de las paredes depende del material, área, aislamiento, espesor y diferencia de temperatura. Las paredes se construirán con PVC de 7 cm de espesor y un coeficiente de conducción de 0.12-0.25 $[w/m^2]$. (Plisticbages Indsutrial S.L., 2019)

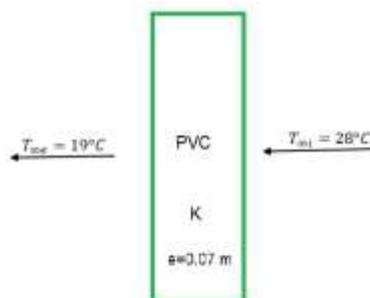
Figura 12*Diagrama de flujo térmico en prototipo*

Tabla 21*Contantes para análisis térmico de paredes*

Descripción	Valor
Coefficiente de conducción	$k_{pvc} = 0.25 [w/m^{\circ}k]$
Espesor	$e = 0.07 [m]$

De la transferencia de calor, Figura 12, se obtiene que el flujo de calor perdido por las paredes está representado por:

$$Q_{paredes} = UA\Delta T \quad (3)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{e}{k_{pvc}} + \frac{1}{h_e} \quad (4)$$

$$\Delta T = T_{\infty i} - T_{\infty e} \quad (5)$$

$$A = 2(axb + axh + bxh) \quad (6)$$

Donde U es el coeficiente de transferencia de calor, A área de transferencia de calor, h_i coeficiente de convección interna, h_e coeficiente de convección externo y ΔT diferencia de temperatura.

Para el cálculo de la convección exterior del prototipo se tiene en cuenta una convección natural, ya que no hay ventilación mecánica exterior y a que se utiliza un material con capacidad de aislamiento térmico que reduce el potencial debido a la diferencia de temperatura entre la pared y el aire del contorno. Se utilizan correlaciones y números adimensionales específicos que se encuentran en la literatura (Cengel & Ghajar, 2011), partiendo que estas correlaciones varían según con la superficie con la que este expuesto el aire, se evalúa que el valor más crítico se presenta sobre las placas horizontales con lo cual se asume que este valor de convección con el ambiente

exterior.

$$h = \frac{Nu * k}{L_c} \quad (7)$$

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty e})L_c^3}{\nu^2} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{T_{pe, \text{°K}}} \quad (9)$$

$$T_{pe} = \frac{T_{se} + T_{\infty e}}{2} \quad (10)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr \quad (11)$$

$$Nu = 0.54 Ra_L \quad (12)$$

$$L_c = \frac{\text{area}}{\text{perimetro}}$$

Para calcular la convección interna, se considera el flujo sobre una placa plana con convección forzada asumiendo que el aire se va a mover a la velocidad a la cual ingresa el aire a la cámara que es de 5 m/s, esto con el ánimo de disminuir la incertidumbre en los cálculos, pues un enfoque desde convección natural o una velocidad menor podría llevar a la selección de una resistencia de calentamiento incapaz de mantener la temperatura objetivo. Para ello, se revisa la literatura (Incropera & De Witt, 1999), la cual proporciona ecuaciones y correlaciones.

$$T_{pi} = \frac{T_{si} + T_{\infty i}}{2} \quad (13)$$

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (14)$$

$$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (15)$$

Las propiedades físicas del aire, en las superficies se obtienen considerando la temperatura de película. Estas variables se determinan utilizando el programa especializado como EES, Tabla 22, se asume inicialmente las siguientes temperaturas superficiales $T_{si} = 27.36 \text{ °C}$ y $T_{se} = 23.24 \text{ °C}$. Sustituyendo en las ecuaciones se obtienen los resultados resumidos en la Tabla 22.

Tabla 22*Propiedades de aire para cálculos térmicos*

Descripción	Superficie exterior	Superficie Interior
	$T_{se} = 23.24^{\circ}\text{C}$	$T_{si} = 27.7^{\circ}\text{C}$
Viscosidad cinemática	$\vartheta = 15.26 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$	$\vartheta = 15.86 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$
Viscosidad	$\mu = 18.31 \times 10^{-6} [\text{Ns}/\text{m}^2]$	$\mu = 18.6 \times 10^{-6} [\text{Ns}/\text{m}^2]$
Densidad	$\rho = 1.199 [\text{kg}/\text{m}^3]$	$\rho = 1.173 [\text{kg}/\text{m}^3]$
Conductividad	$k = 0.025 [\text{w}/\text{m}^{\circ}\text{k}]$	$k = 0.025 [\text{w}/\text{m}^{\circ}\text{k}]$
Numero de Prandalt	$Pr = 0.729$	$Pr = 0.727$
Coefficiente de expansión volumétrica	$\beta = 0.003 \text{K}^{-1}$	$\beta = 0.003 \text{K}^{-1}$
Calor específico	$C_p = 1004 [\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{k}]$	

Tabla 23*Constantes de flujo de aire para cálculos térmicos*

Descripción	Valor
Numero de Grashof	$Gr_L = 7.028 \times 10^5$
Numero de Reynolds interior	$Re = 2.2 \times 10^5$
Nusselt superficie exterior	$Nu = 14.45$
Nusselt superficie interior	$Nu = 626.7$
Coefficiente de convección externo	$h_e = 3.47 [\text{w}/\text{m}^2\text{k}]$
Coefficiente de convección interno	$h_i = 23.02 [\text{w}/\text{m}^2\text{k}]$

Resolviendo las ecuaciones se obtiene:

Tabla 24*Resultados de solución de ecuaciones de transferencia de calor*

Descripción	Valor
Coefficiente de transferencia de calor	$U = 1.635 [\text{w}/\text{m}^2\text{k}]$
Área	$A = 1.62 [\text{m}^2]$
Diferencia de temperatura	$\Delta T = 9 [^{\circ}\text{C}]$
Calor perdido por las paredes	$Q_{\text{paredes}} = 23.84 [\text{w}]$

Nota. La carga térmica perdido por medio de las paredes es de 23.84 watt.

6.2.2.4 Requerimientos térmicos debido a la renovación de aire. De acuerdo con los requisitos de la cámara y el ventilador seleccionado, el flujo volumétrico se establece en $\dot{V}_r = 20[m^3/h]$, lo cual equivale a $\dot{V}_r = 5.55 \times 10^{-3}[m^3/s]$. Para lograr que el aire que ingrese al sistema alcance la temperatura deseada de $T_{\infty i} = 28^\circ C$, es necesario asegurarse de que el flujo de calor sea suficiente. Cabe mencionar que la temperatura mínima del ambiente exterior es de $T_{\infty e} = 19^\circ C$.

$$Q_{renovacion} = \dot{V} * \rho * Cp_{aire} * (T_{\infty i} - T_{\infty e})$$

Sustituyendo en las ecuaciones se obtiene:

Calor requerido con la ventilación
$Q_{renovacion} = 60.12[w]$

6.2.2.5 Carga térmica para calentar el fvh. Se debe de tener en cuenta la cantidad de materia seca y humedad presente en el cultivo de FVH, donde se asume el comportamiento de la materia seca como granos de maíz y de la humedad como agua. Este enfoque permite tomar en consideración las propiedades térmicas específicas de los componentes del FVH y determinar la cantidad de calor necesaria para alcanzar la temperatura deseada. Donde el porcentaje de materia seca es de 22.08% (Gómez Burneo, 2008) y el calor específico del maíz es de 1980 J/kg^{°k} tomado de (Raziye & Emin, 2008), mientras que el calor específico del agua es de 4183 J/kg^{°k} el cual se toma de EES.

En la Tabla 25 se resumen las constantes térmicas establecidas como datos de entrada para los cálculos térmicos.

Tabla 25*Constantes térmica del maíz y el agua*

Descripción	Valor
Materia seca	$\%MS = 22.08 \%$
Humedad	$\%Hum = 77.92 \%$
Calor específico maíz	$Cp_{maiz} = 1980 [J/kg^{\circ}K]$
Calor específico agua	$Cp_{agua} = 4183 [J/kg^{\circ}K]$
Tiempo de calentamiento	$t = 6[min]$

Nota. Constantes térmicas de maíz tomadas de (Gómez Burneo, 2008)

De donde se obtiene que la energía requerida para aumentar la temperatura cultivo es:

$$E_{FVH} = \%MS * kg_{producidos} * Cp_{maiz} * (T_{\infty i} - T_{\infty e}) + \%Hum * kg_{producidos} * Cp_{agua} * (T_{\infty i} - T_{\infty e}) \quad (16)$$

$$Q_c = \frac{E_{FVH}}{t} \quad (17)$$

$$Q_{req-c} = Q_c + Q_{renovacion} + Q_{paredes} \quad (18)$$

Realizando los cálculos se obtiene:

Tabla 26*Calor de germinación*

Descripción	Valor
Energía necesaria para calentarlo el FVH	$E_{FVH} = 74524[J]$
Calor por calentamiento	$Q_c = 207[W]$
Calor requerido con calefacción	$Q_{req-c} = 290.96 [W]$

6.2.2.6 Resistencia eléctrica de calefacción. Se requiere determinar la resistencia eléctrica necesaria para calentar el sistema. Se emplea alambre de níquel-cromo de 0.5 mm de

diámetro, y se determinará su longitud, la cual está apoyada en cerámicos según se observa en la Figura 9. Las propiedades del alambre se detallan en la Tabla 26.

Figura 13

Montaje de resistencia NiCr



Tabla 27

Propiedades de la resistencia niquel-cromo

Descripción	Valor
Resistividad	$\rho_{NiCr} = 0.95 [\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}]$
Diámetro del cable	$\phi = 0.5 [\text{mm}]$
Temperatura máxima	$T_{max} = 1050 [^{\circ}\text{C}]$

Nota. Tomado de Kanthal. (02 de febrero de 2020). NIKROTHAL Resistance heating wire and resistance wire. Kanthal.com. <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/nikrothal-20/>

La potencia máxima requerida para el calentamiento se presenta en el calentamiento de FVH que es 291.8 [w], la tensión eléctrica en las zonas residenciales en Bucaramanga es de 110 [V], donde la potencia y la resistencia eléctricas se calcula a partir de:

$$Pot = \frac{Vol^2}{R} \quad (19)$$

$$R = \rho_{NiCr} * \frac{L}{A_c} \quad (20)$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} * \varnothing^2 \quad (21)$$

Realizando los cálculos se obtiene:

Tabla 28

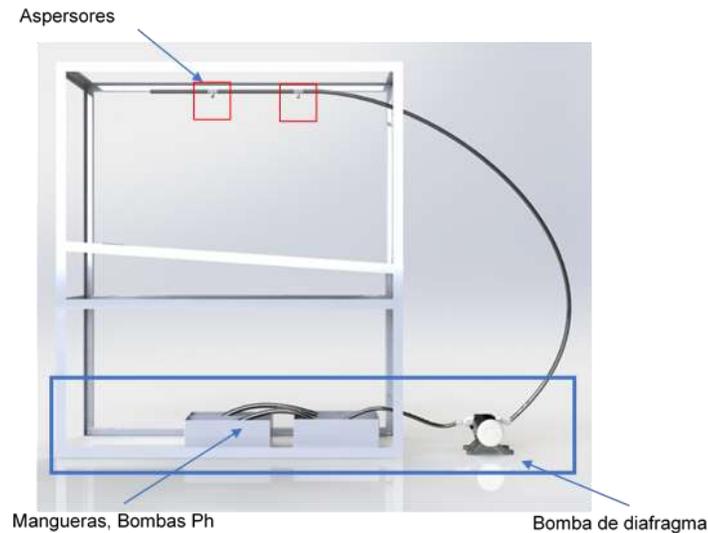
Valores para análisis de resistencia térmica

Descripción	Valor
Resistencia	$R = 41.58[\Omega]$
Área transversal del cable	$A_c = \pi/16[mm^2]$
Longitud del cable	$L = 8.6 [m]$

Se utiliza un hilo de níquel-cromo con diámetro de 0.5 mm y una longitud de 8.6 m, que van a estar enrollada y distribuida sobre 10 carretes cerámicos que aíslan los soportes en los dos ductos.

6.2.3 Sistema de Riego

Se dispone de una bomba de diafragma para nebulizar, para el control del pH se usan dos bombas, una para solución acida y una alcalina, sumergibles, Figura 14 y Figura 15.

Figura 14*Vista frontal del subsistema de bombeo en el prototipo***Figura 15***Bomba de diafragma para nebulización*

La altura hasta nebulizadores es, $\Delta H_h = 0.8m$ metros, una presión de salida manométrica de la bomba de diafragma disponible es de $P_d = 0.75Mpa = 76.5m. c. a.$. El caudal solicitado por los dos nebulizadores es de $Q=0.15LPM$, dato relevante para calcular las perdidas energéticas del de flujo de agua a temperatura ambiente modelado como incompresible, estacionario y

newtoniano, por lo que se aplica el principio de Bernoulli, donde el subíndice 1 representa a entrada, y el dos la salida a presión atmosférica, se consideran las perdidas por fricción, por altura entre la salida de la bomba y los nebulizadores, se desprecian perdidas cinemáticas. Se usan 1.5 metros de mangueras plásticas de PVC, de diámetro interno $D=1\text{cm}$, se toma una rugosidad $\varepsilon = 0.001\text{mm}$. El análisis en cabezas de presión expresadas en metros columna de agua es:

$$H_r = H_1 - H_2 = \Delta H_m + \Delta H_f + \Delta H_h ; 0.2 * \Delta H_f = \Delta H_m ; \quad (22)$$

$$\Delta H_f = (r) * Q^2 ; r = \frac{(8 * f * L)}{\pi^2 * D^5 * g} ; f @ (Re, \frac{\varepsilon}{D}) \quad (23)$$

$$Re = 4 * \frac{Q}{\pi * D * v} ; v = 0.05434 \frac{m^2}{s} \quad (24)$$

$$\text{Se tiene que: } \Delta H_f = 29.63\text{m. c. a.} ; H_r = 36.34 ; \quad (25)$$

$$N = \frac{H_d}{H_r} = \frac{76.5}{36.34} = 2.1 \quad (26)$$

La cuantificación de la proporción entre la cabeza de presión requerida H_r y la disponible H_d da un valor de $N=2.1$, valores menores a uno indicarían que teóricamente la bomba no es capaz de cumplir con su tarea, por otro lado, un dos implica que está a la mitad de su capacidad por lo que se considera que, teóricamente hablando, se tiene una baja incertidumbre en cuanto a la eficacia con la que la bomba desarrollaría su labor.

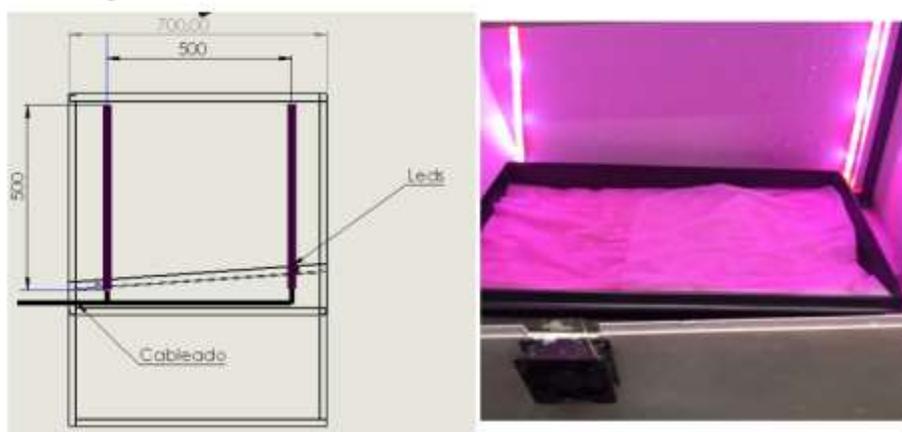
6.2.4 Sistema de Iluminación

Se implementará iluminación LED roja y azul para mejorar el rendimiento del cultivo de FVH (Gunasekaran, 2022). Las tiras LED con una proporción de 70% de luz roja y 30% de luz azul son las más efectivas y están disponibles en el mercado. Las tiras seleccionadas son impermeables y operan a 12 V (ALIEXPRESS, 2022) y son WaterProff IP65 cada LED RGB 5050 SMD tiene un ángulo de apertura de haz de luz de 120° y una potencia de 25 microvatios (Lou y

otros, 2021). Para el requisito de 1500 micro vatios por metro cuadrado, con 66 leds por metro, se requieren 2 tiras de 250 mm de largo, separadas 500 mm **Figura 16**.

Figura 16

Instalación de la iluminación



6.2.5 Sistema de Control

El control del proceso de la formación biológica de biomasa a partir de las semillas de maíz hace necesario el diseño de un sistema de control para los actuadores con el propósito de mantener condiciones ambientales adecuadas y temporizar la nebulización.

6.2.5.1 Control de Temperatura. El control de temperatura se realiza mediante una resistencia eléctrica controlada por un microcontrolador Arduino con un algoritmo PID. El Set Point es de 28°C, temperatura óptima para el cultivo de FVH. El sensor DHT22 mide la temperatura y la humedad, y el valor entregado es la variable de entrada del algoritmo. La diferencia entre el valor deseado y el real se utiliza para controlar la potencia que pasa

a través de la resistencia.

6.5.2.2 Control de pH y EC. Para mantener la solución nutritiva en valores óptimos de cantidad de nutrientes y pH se hace el control de EC y pH se implementa el control descrito en el diagrama de flujo de la Figura 10.

6.3 Construcción del Prototipo y Puesta en Marcha

Esta sección se centra en el proceso de fabricación, y puesta en marcha. También, se revisa el rendimiento del sistema para recolección datos para determinar la viabilidad de implementación.

6.3.1 Estructura de soporte

La cámara se construyó con operarios externos y se recubrió con pintura anticorrosiva y láminas de PVC, Figura 17, con unión adhesiva de silicona industrial. El PVC es un material ligero, resistente al calor y estéticamente agradable.

Figura 17

Estructura construida y recubierta con PVC



Figura 18

Resistencia de calefacción



Figura 19

Sistema de iluminación en funcionamiento en prototipo



Figura 20

Montaje de dosificación de reguladores de PH en prototipo



El sistema de calefacción. se instala con las precauciones necesarias para el seguro funcionamiento del actuador, Figura 18 la resistencia de níquel cromo que es instalada en compañía de argollas cerámicas con buena capacidad de aislamiento térmico y eléctrico.

Sistema de iluminación. Fue necesario tener en cuenta las conexiones eléctricas y retirar de la cinta de iluminación el pegante que trae en la parte trasera para luego hacer la respectiva instalación que consiste en pegar la cinta con resistencia IP65, resistente al agua, validado esto durante la experimentación, a la superficie de PVC Figura 19.

Sistema de fertirriego. Compuesto por tres bombas, filtro, mangueras flexibles, accesorios de direccionamiento y nebulizadores se instala el sistema de fertirriego con el respectivo sensor de pH y electro conductividad, Figura 20, usado para accionar las bombas de regulación de calidad de la solución, además a la bandeja usada se abren agujeros para conseguir la recirculación.

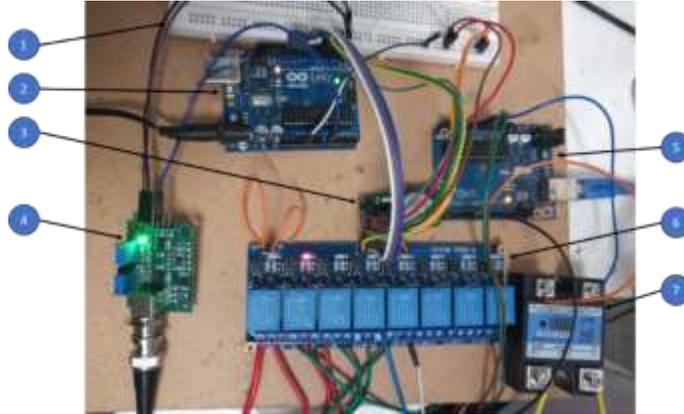
Hardware sistema de control. la lista de materiales usados para el control del prototipo es contenida en la Tabla 29. Para el control PID y otros controles, se utilizaron dos Arduino con atmega328p. Un Arduino no pudo realizar todas las tareas a tiempo, por lo que se dividió el código en dos tarjetas como se muestra en la Figura 21.

Modelado del sistema dinámico de calefacción. La Figura 22 muestra los valores de temperatura en el tiempo con una señal escalón del 100%. El comportamiento de la planta es estable, por lo que se modeló como un sistema de primer orden con tiempo muerto. Con Matlab y su herramienta de identificación de sistemas se establecen los valores de las constantes de la función de transferencia para un modelo de primer orden con tiempo muerto:

$$p = \frac{k \cdot e^{-\theta}}{\tau \cdot s + 1} = \frac{0.134 \cdot e^{-380}}{442 \cdot s + 1} \quad (27)$$

Figura 21

Montaje de componentes electrónicos para el hardware del sistema de control

**Figura 22**

Temperatura en función del tiempo con 100% del voltaje disponible

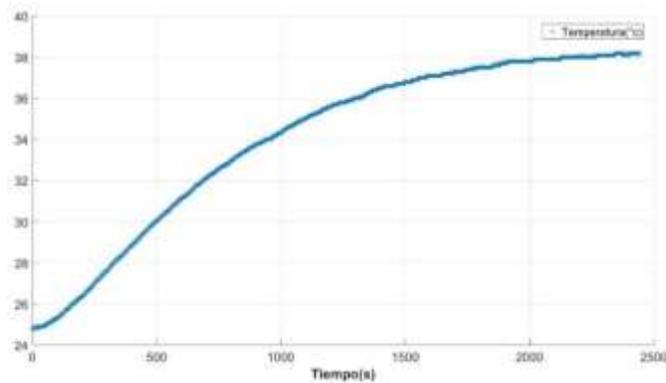


Tabla 29*Lista de componentes en el sistema de control*

Nombre	Utilidad
1 Protoboard	Conexiones varias
2 Arduino uno	Control de la calidad de solución nutritiva de la iluminación
3 Reloj Tiempo Real Rtc Ds3231 I2c	Proveer el valor de la variable tiempo al controlador
4 Sensor De Ph ESP32	Proveer el valor de la variable tiempo al controlador
5 Arduino uno	Control de aire, temperatura y humedad.
6 Modulo relés mecánicos x8	Accionamiento de los diferentes actuadores
7 Relé de estado solido	Control de voltaje de resistencia de calefacción

Sintonización de PID. Se usaron las reglas de sintonización de PID de zigger y nicols (Ogata, 1993). El modelo matemático usado ha sido divulgado por la literatura y la academia (Rivera E., 1999) caracteriza los valores del controlador en función de las contantes de la función de transferencia de la planta . Adicional a ello, se introduce un valor lambda λ con el que es posible modificar el valor de k para un PID en tiempo continuo y forma ideal:

$$C_{PID}(S) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I S} + \tau_D \right); 0 < C_{PID} < 100 \quad (28)$$

Figura 23

Valores lambda de sintonización de PID

Controller	KK_c	τ_I	τ_D	τ_F	Recommended $\frac{\lambda}{\theta}$ ($\lambda > 0.2\tau$ always)
“Original” PI	$\frac{\tau}{\lambda}$	τ	—	—	> 1.7
“Improved” PI	$\frac{2\tau+\theta}{2\lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	—	—	> 1.7
PID	$\frac{2\tau+\theta}{2(\lambda+\theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{2\tau+\theta}$	—	> 0.8
PID with filter	$\frac{2\tau+\theta}{2(\lambda+\theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{2\tau+\theta}$	$\frac{\lambda\theta}{2(\lambda+\theta)}$	> 0.25

Nota. Tomado Rivera E., D. (1999). Internal Model Control: A Comprehensive View. Department of Chemical, Bio and Materials Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona (85287-6006), 23.

$$C_{PID}(S) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I S} + \tau_D \right); 0 < C_{PID} < 100 \quad (29)$$

Tabla 30

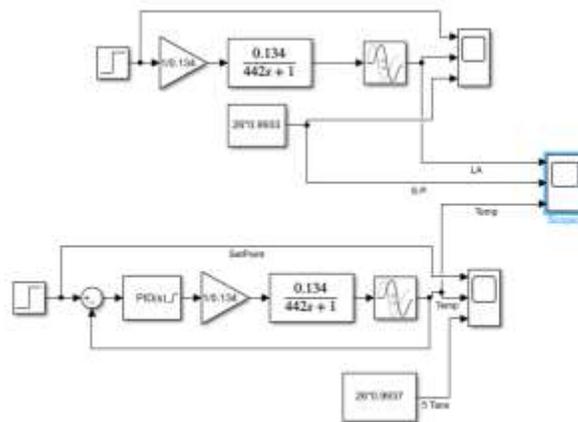
Variables de controlador

Descripción	Valor
Acción de control, con límites anti WindUp	$C_{PID}(S)$
Constante proporcional	k_c
Constante de tiempo integral	τ_I
Constante de tiempo derivativa	τ_D

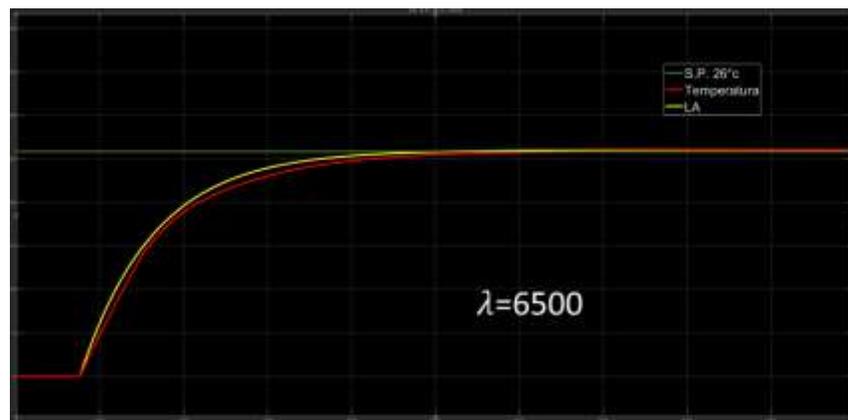
Para encontrar los valores de sintonización de PID, se simula el sistema bajo un control de lazo cerrado y uno de lazo abierto Figura 24. El valor de lambda que mejor se ajusta al control de lazo abierto es 6500, Figura 25. Valores menores hacen crecer la constante proporcional, lo que puede desestabilizar el sistema. Valores mayores pueden tardar más en estabilizar el sistema.

Figura 24

Montaje de simulación en Simulink

**Figura 25**

Simulación de controlador PID; $\lambda=6500$



Los valores para las constantes de sintonización obtenidos son:

Tabla 31

Resultados constantes de sintonización PID

Constante	Valor
k_c	0,7050
τ_I	632
τ_D	132,8797
λ	6500

6.3.2 Puesta en marcha del prototipo

Partiendo de la información proporcionada, donde se desea producir 2 kg de FVH con una densidad de siembra de 1.9 kg de semilla por metro cuadrado y un rendimiento aproximado de 8 kg de FVH por kg de semilla, se procede a realizar el cultivo con 280 g de semilla de maíz. El proceso es el mismo descrito en el apartado 0 y (FAO, 2001).

Figura 26

Etapas de lavado y pre-germinación de semilla



Nota. Se usa solución de hipoclorito de sodio al 1%

Figura 27

Germinación de semillas y resultado final del cultivo

**Figura 28**

Peso inicial y final del cultivo

**6.3.2 Rendimiento del cultivo**

El cultivo produjo en un intervalo de 9 días 2,185 kilogramos de forraje hidropónico, inicialmente se realizó la siembra de 280 gramos de maíz, con lo cual se obtiene un rendimiento de $7,8 \text{ kg}_{FVH}/\text{kg}_{semilla}$ lo cual se logra de evidenciar en la Figura 28.

7. Diseño en Detalle del Sistema de Producción de 500kg

Se usan los resultados de la experimentación para seleccionar algunos materiales e inclusive usar los códigos embebidos del control para el diseño del sistema en grande.

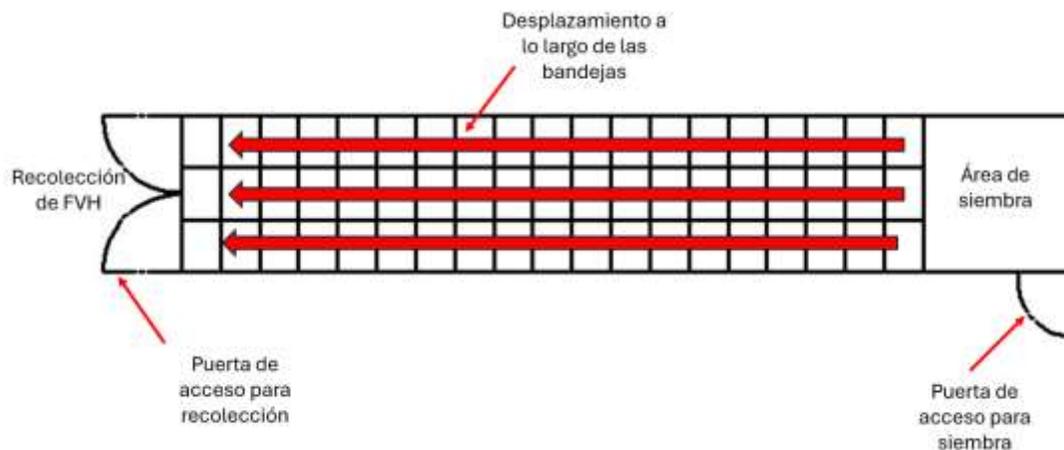
7.1 Parámetros de Diseño

Este sistema debe de tener la capacidad de producir 500 kg de FVH por día y que se lo mas compacto posible, se diseña teniendo en cuenta las condiciones del clima en la ciudad de Bucaramanga, en donde el comportamiento de la temperatura máxima promedio, al medio día, es de 28°C (IDEAM, 2015).

7.2 Diseño de la Estructura y Selección Del Contenedor

Figura 29

Esquemático de proceso de siembra en contenedor



La construcción del sistema dentro del contenedor implica una disposición de bandejas en diferentes niveles y tres hileras que tienen la capacidad de desplazarse horizontalmente. Es

fundamental considerar que el sistema debe estar equipado con dos puertas: una para acceder al área de siembra del cultivo y otra para facilitar la recolección de este, tal como se ilustra en la Figura 29.

Para el mantenimiento y limpieza del contenedor, es necesario realizar una parada en la producción con una periodicidad máxima de 8 meses, la cual debe planificarse con antelación. Además, en caso de que se presente alguna proliferación de hongos y bacterias en alguna bandeja, se debe declarar el cultivo en estado de cuarentena y llevar a cabo fumigaciones, además de determinar la fuente de propagación del problema.

7.2.1 Selección de bandejas de siembra

Primero se calcula el área de cultivo necesaria para densidad de siembra de 2.6 kg/m², y en base al rendimiento de 7.804 kg de FVH por kg de semilla.

$$Kg_{sem} = \frac{Kg_{producidos}}{R} \quad (30)$$

Para garantizar la producción se decide aumentar en un 5% la cantidad de semillas a sembrar.

$$Kg_{sem-s} = 1.05 * Kg_{sem} \quad (31)$$

$$\rho_{sim} = \frac{Kg_{sem-s}}{A_{cultivo}} \quad (32)$$

Tabla 32*Densidad de siembra para diseño final*

Descripción	Valor
Kilogramos de FVH producidos en el día	$Kg_{producidos} = 500$ [kgFVH]
Rendimiento del cultivo	$R = 7.804$ [kg FVH/ kg de semilla]
Densidad de siembra	$\rho_{sim} = 2.6$ [kgsemilla/m ²]

A partir de la solución de las ecuaciones se obtiene:

Tabla 33*Proyección de producción para diseño final*

Descripción	Valor
Kilogramos de semillas a cultivar.	$Kg_{sem} = 64.07$ [kg de semilla]
Kilogramos de semillas para cultivar necesarios en el cultivo con sobreproducción.	$Kg_{sem-s} = 67.3$ [kg de semilla]
Área de cultivo	$A_{cultivo} = 25.86$ [m ²]

7.2.2 Selección de Bandejas

Se opta por el modelo SC-BFP de la marca Plástica. (Hidroponia industrial, 2022) cuyas dimensiones son: 56 [cm] \times 75[cm] \times 7[cm].

Cálculo del área de cultivo de una bandeja:

$$A_{bandeja} = L_{bandeja} * AnC_{bandeja} \quad (33)$$

Tabla 34*Dimensiones de bandeja de siembra*

Descripción	Valor
Largo de la bandeja.	$L_{bandeja} = 56$ [cm]
Ancho de la bandeja.	$Anc_{bandeja} = 75$ [cm]
Área de la bandeja.	$A_{bandeja} = 0.42$ [m ²]

Numero de bandejas requeridas para el cultivo diario:

$$N_{bandejas-dia} = \frac{A_{cultivo}}{A_{bandeja}} \quad (34)$$

Tabla 35*Número de bandejas necesarias*

Numero de bandejas
$N_{bandejas-dia} = 62$ [bandeja]

Número de bandejas requeridas para los nueve días de cultivo:

$$N_{bandejas-total} = N_{bandejas-dia} \times N_{dias} \quad (35)$$

Tabla 36*Bandejas de cultivo totales*

Numero de bandejas
$N_{bandejas-total} = 558$ [bandeja]

Ahora se calcula la producción de FVH tiene cada bandeja.

Tabla 37*Área de cultivo cubierta por bandejas*

Descripción	Valor
Área de cultivo	$A_{bandeja} = 0.42 \text{ [m}^2\text{]}$
Kilogramos de semillas para cultivar necesarios en el cultivo con sobreproducción.	$Kg_{sem-s} = 1.09 \text{ [kg de semilla]}$
Kilogramos de FVH producidos en la cosecha	$Kg_{producidos} = 8.52 \text{ [kgFVH]}$

7.2.3 Selección del Contenedor

Para un rendimiento óptimo, el FVH debe cultivarse en un ambiente controlado. Un contenedor aislará el ambiente exterior y proporcionará las condiciones adecuadas de humedad, temperatura, oxigenación e iluminación. Para garantizar el área de cultivo adecuada, se debe considerar la distribución de las bandejas y el número de niveles. En este caso, se ha seleccionado un contenedor DRY VAN 40' HIGH CUBE, que tiene las siguientes dimensiones:

Tabla 38*Dimensiones contenedor 40' HIGH CUBE*

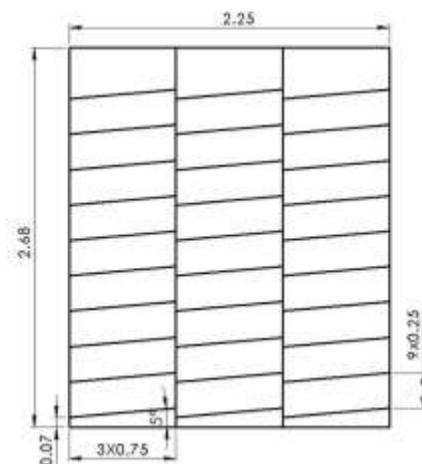
Dimensiones contenedor	Ancho	Alto	Largo
Medidas internas [m]	2.35	2.7	12.03
Medidas exteriores [m]	2.44	3.19	12.19

7.2.4 Distribución de las Bandejas

Considerando el crecimiento potencial del cultivo de hasta 21 cm, se ha determinado que se requiere una separación de 25 cm entre bandejas. Además, para una distribución óptima, se han dispuesto tres filas de bandejas horizontalmente y de diez pisos, como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Esquemática distribución de bandejas ene estructura



Cálculo del número de filas que van a estar a lo largo del contenedor:

$$N_{filas} = \frac{N_{bandejas}}{\# columnas \times \# pisos} \quad (36)$$

Tabla 39

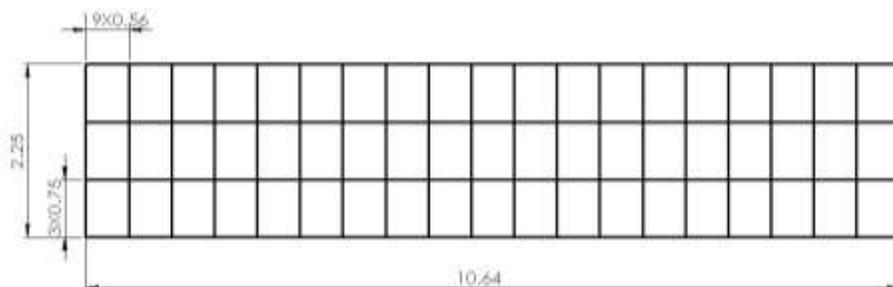
Pisos, filas y columnas necesarios para el sistema de producción

Constante	Descripción	Valor
$N_{bandejas}$	Número de bandejas	558
$\# columnas$	Número de columnas	3
$\# pisos$	Número de pisos	10
N_{filas}	Número de filas	19

Se puede visualizar la distribución de las bandejas en el sistema por pisos en la Figura 31.

Figura 31

Esquemática vista superior de sistema de producción



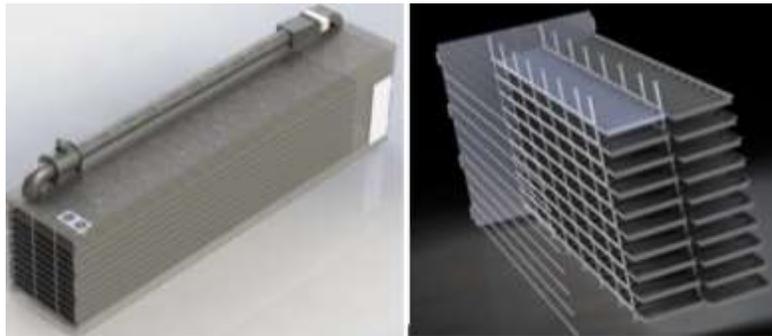
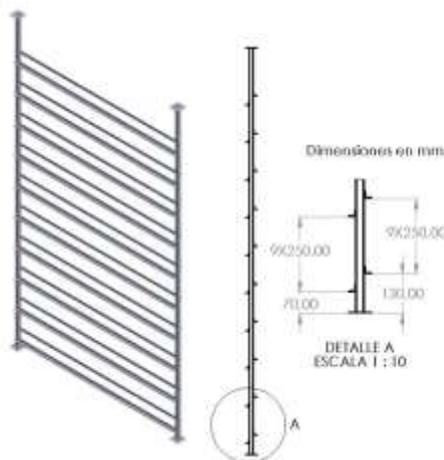
Seguido de ello se compara que la longitud del contenedor sea mayor a la ocupado por el largo de las bandejas.

Tabla 40

Filas de estructura

Descripción	Valor
Número de filas	$N_{filas} = 19$
Longitud ocupada por las bandejas a lo largo	10.64[m]
Largo del contenedor	12.03 [m]

Con lo cual se determina que el contenedor si tiene la capacidad de almacenarlas.

Figura 32*Hileras de la estructura***Figura 33***Pieza de estructura*

7.2.5 Diseño de la Estructura que Soporta las Bandejas

La estructura está compuesta por tres hileras de bandejas, Figura 32, soportadas por vigas de perfil en L de acero. Las vigas se apoyan en dos pilastras en el centro y en las paredes del contenedor. El diseño de la estructura permite el desplazamiento lineal de las bandejas. Las vigas deben soportar el peso máximo del forraje en la etapa final de producción. Se considera que cada bandeja soporta la mitad del peso. Las vigas tienen 1,5 metros de largo y se apoyan en tubos

cuadrados de acero Figura 33.

7.2.5.1 Diseño de la viga. En el apéndice G se presentan los procedimientos de cálculo para seleccionar el perfil ASTM A36 L2.5x25. El dato de entrada es los **8.522**[Kg_{FVH}] producidos por bandeja. Los resultados de dichos cálculos se disponen en la **Tabla 41**.

Tabla 41

Esfuerzos calculados de la resistencia

Descripción	Valor
Esfuerzo en dirección x	$\sigma_x = 86.87 [MPa]$
Esfuerzo en dirección y	$\sigma_y = 0 [MPa]$
Esfuerzo cortante en xy	$\tau_{xy} = 0 [MPa]$
Esfuerzo cortante máximo	$\tau_{max} = 43.44 [MPa]$
Factor de seguridad de la viga	$N_{viga} = 2.8$
Deformación máxima	$Y_{max} = 4.8 [mm]$

Se obtuvo un factor de seguridad aceptable, como una deformación máxima admisible.

Tabla 42

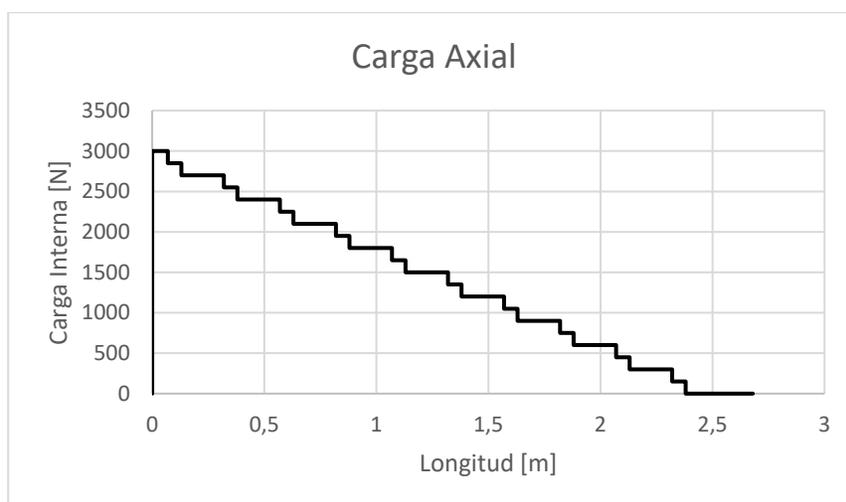
Calculo del cordón de soldadura

Descripción	Valor
Fuerza cortante	$R_a = 75 [N]$
Longitud del cateto de la soldadura	$h_e = 1 \times 10^{-3} [m]$
Longitud de la soldadura	$L_w = 4 \times 10^{-3} [m]$
Resistencia a la fluencia	$S_{ysol} = 413 [MPa]$
Factor de seguridad soldadura	$N_{sold} = 7.78$

7.2.5.2 Cordón de Soldadura que Soporta la Viga. Similar al cálculo del apartado 0, se usa el procedimiento de cálculo contenido en el Apéndice D paralela y transversal, (Hamrock y otros, 2000), Se selecciona un electrodo E7024 del catálogo Westarco, los resultados se resumen en la Tabla 42.

Figura 34

Diagrama de carga axial



7.5.2.3 Calculo parales centrales. Se utilizará acero ASTM A36, con perfiles cuadrados de 30 mm x 1.5 mm de espesor para la construcción de los soportes. Se enfocará especial atención en los soportes ubicados en la etapa final de producción del cultivo, ya que son los más críticos.

Tabla 43*Propiedades mecánicas de perfiles seleccionados*

Descripción	Valor
Área transversal	$A = 1.16 \times 10^{-4} [m]$
Resistencia a la fluencia	$s_y = 235 [MPa]$

Teniendo en cuenta la distribución de la columna según la Figura 33 y reacciones que a las que someten las vigas y, por consiguiente, se desarrolla el diagrama de fuerza axial mostrado en la Figura 34.

Se analiza como un elemento sometido a carga axial únicamente y según la mecánica de materiales su esfuerzo y factor de seguridad se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (37)$$

$$N = \frac{s_y}{\sigma} \quad (38)$$

Realizando los cálculos y teniendo en cuenta las propiedades del tubo se obtiene

Tabla 44*Carga crítica y factor de seguridad*

Descripción	Valor
Carga crítica	$P_c = 3000 [N]$
Esfuerzo normal	$\sigma = 25.86 [MPa]$
	$N = 9$

7.3 Diseño de sistema de calefacción

El sistema consiste en una cámara acondicionada del tamaño de un contenedor DRY VAN

40' HIGH CUBE, cuya temperatura debe mantenerse en un rango de 25°C a 28°C. Según la (FAO, 2001), este rango de valores ofrece las condiciones óptimas para el crecimiento y producción de forraje de maíz. El sistema de calefacción se basa en una fuente de energía eléctrica, utilizando ventiladores y resistencias eléctricas.

Dicha instalación se llevará a cabo en la ciudad de Bucaramanga, donde la temperatura mínima promedio anual es de aproximadamente 19°C, según (IDEAM, 2015).

Tabla 45

Temperaturas de diseño

Temperatura	Valor
Interior	$T_{\infty i} = 28^{\circ}C$
Exterior	$T_{\infty e} = 19^{\circ}C$

7.3.1 Renovación de Aire

Para sistemas más grandes la renovación del aire puede variar entre 40 y 60 renovaciones por hora, (HydroEnviroment, 2022), para este caso particular se utilizo $N_{renovaciones} = 40[renovaciones/h]$, con ello se calcula el caudal necesario para la renovación:

$$\dot{V}_r = VxN_{renovaciones} \quad (39)$$

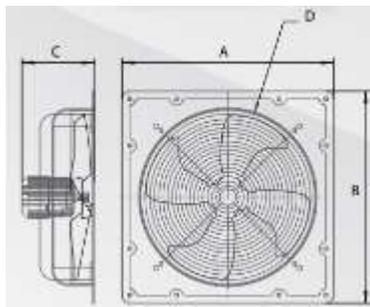
De acuerdo la Tabla 38 se obtienen las dimisiones del sistema, utilizando la ecuación 53 con lo que se obtiene:

Tabla 46*Volumen y flujo volumétrico del diseño*

Descripción	Valor
Volumen	$V = 76.33[m^3]$
Flujo volumétrico	$\dot{V}_r = 3053.214[m^3/h]$

El flujo volumétrico mínimo de aire requerido para la renovación es de $\dot{V}_r = 3053.214[m^3/h]$, se seleccionó dos ventiladores Airmax 12 WF que tienen un flujo volumétrico de $\dot{V} = 2100 [m^3/h]$.

Además, se necesita instalar dos ventiladores adicionales para extraer el aire del recinto. Cuyas dimensiones son:

Figura 35*Ventilador seleccionado extracción de aire*

Descripción	Valor
A	413 [mm]
B	413 [mm]
C	220 [mm]
D	300 [mm]

La velocidad con la que ingresa el aire al recinto se calcula con la ecuación $\dot{V}_r = v * S$, la cual depende de la geometría del ventilador:

Tabla 47*Valores mecánicos del ventilador seleccionado*

Descripción	Valor
Área del flujo del ventilador	$S = 70.69 \times 10^{-3} [m^2]$
Velocidad	$v = 8.23 [m/s]$

7.3.2 Cálculos térmicos

Para calcular los coeficientes de convección, se considera que en el interior del sistema tiene convección forzada, mientras que en la superficie exterior se presenta una convección natural. A fin de realizar estos cálculos, se emplean las correlaciones previamente mencionadas, de acuerdo con las ecuaciones 7 a la 12.

Las propiedades físicas del aire en las superficies se obtienen considerando la temperatura de película, estas son determinadas con ayuda del programa especializado EES, donde se tiene en cuenta en las obtenidas en la Tabla 48

Constantes de flujo para cálculos térmicos en el diseño térmico debido a que la variación de estas con muy pocas debido a que la temperatura no.

Sustituyendo en las ecuaciones se obtiene:

Tabla 48

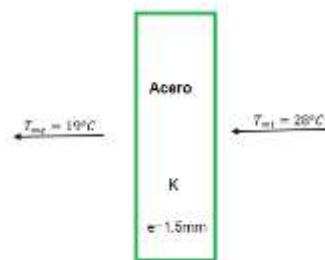
Constantes de flujo para cálculos térmicos en el diseño térmico

Descripción	Valor
Numero de Grashof	$Gr_L = 1.305 \times 10^9$
Numero de Reynolds interior	$Re = 6.416 \times 10^6$
Nusselt superficie exterior	$Nu = 147.5$
Nusselt superficie interior	$Nu = 9293$
Coefficiente de convección externo	$h_e = 2.367 [W/m^2K]$
Coefficiente de convección interno	$h_i = 19.37 [W/m^2K]$

7.3.2.1 Pérdida de Calor por las Paredes. Para calcular el flujo de calor perdido hacia el ambiente, se consideran los conceptos mencionados anteriormente en el capítulo 6 especialmente en el apartado 0 así como la superficie de las paredes del contenedor, Dichas paredes están fabricadas con chapa de acero y tienen un espesor de 1.5 mm. Teniendo en cuenta que el coeficiente de conducción térmica para el acero es de $50.2 [w/m^2]$.

Figura 36

Diagrama de flujo de calor en pared



Remplazando en las ecuaciones de la 13 a la 15. se obtiene:

Tabla 49*Constantes de transferencia de calor en sistema térmico*

Descripción	Valor
Coefficiente de transferencia de calor	$U = 2.109 [W/m^2K]$
Área	$A = 123.1[m^2]$
Diferencia de temperatura	$\Delta T = 9[^\circ C]$
Calor perdido por las paredes	$Q_{paredes} = 2.34 [kW]$

7.3.2.2 Requerimientos Térmicos Debido a la Renovación de Aire. De acuerdo con los requerimientos de la cámara y los ventiladores seleccionados, el flujo volumétrico necesario a calentar es de $\dot{V}_r = 4200[m^3/h]$, el cual es equivalente a $\dot{V}_r = 1.167[m^3/s]$. Donde la temperatura de la cámara $T_{\infty i} = 28^\circ C$ y la temperatura mínimo promedio de Bucaramanga $T_{\infty e} = 19^\circ C$.

$$Q_{req-v} = \dot{V} * \rho * c_{p\text{aire}} * (T_{\infty i} - T_{\infty e})$$

Sustituyendo se obtiene que el flujo de calor es de:

Tabla 50*Calor requerido para desarrollo de cultivo*

Calor requerido con en la renovación de aire
$Q_{req-v} = 12.56 [kW]$

7.3.2.3 Calor Requerido en el Calentamiento del FVH. Teniendo en cuenta que la cantidad de calor requerida está relacionada con la presencia de materia seca y humedad

en el forraje de alta humedad (FVH), se realizan consideraciones según la etapa de cultivo en la que se encuentre. A continuación, se describen estas etapas:

Los primeros tres días se consideran como la fase de germinación de las semillas, donde se toma en cuenta la cantidad de semillas como materia seca.

- Los tres días siguientes representan una etapa de producción con un rendimiento del 50%.
- Los últimos tres días se consideran como una etapa de producción con un rendimiento del 100%.

Donde el porcentaje de materia seca en el forraje ya germinado se asume de 22.08% según, (Gómez Burneo, 2008), y que el calor específico del maíz es de 1980 J/kg°k tomado de (Raziye & Emin, 2008) y mientras que el calor específico del agua es de 4183 J/kg°k el cual se toma del programa especializado EES. Asumiendo que el tiempo de calentamiento del sistema es de 105 minutos.

Con base en lo mencionado, se procede a calcular la energía necesaria para el calentamiento del cultivo utilizando las siguientes ecuaciones:

$$E_{FVH-100\%} = (\%MS * Cp_{maiz} * \Delta T + \%Hum * Cp_{agua} * \Delta T) * 500 * 3$$

$$E_{FVH-50\%} = (\%MS * Cp_{maiz} * \Delta T + \%Hum * Cp_{agua} * \Delta T) * 250 * 3$$

$$E_{FVH-singerminar} = 3 * Kg_{sem-s} * Cp_{maiz} * \Delta T$$

$$E = E_{FVH-100\%} + E_{FVH-50\%} + E_{FVH-singerminar}$$

Tabla 51*Constantes de térmicas del maíz.*

Descripción	Valor
Materia seca	$\%MS = 22.08 \%$
Humedad	$\%Hum = 77.92 \%$
Calor específico maíz	$Cp_{maiz} = 1980 [J/kg^{\circ}K]$
Calor específico agua	$Cp_{agua} = 4183 [J/kg^{\circ}K]$
Tiempo de calentamiento	$t = 105 [min]$

Seguido de ello se determina la cantidad calor requerido:

$$Q_c = \frac{E}{t}$$

$$Q_{req-c} = Q_c + Q_{renovacion} + Q_{paredes}$$

Realizando los cálculos se obtiene:

Tabla 52*Energía necesaria para germinación*

Descripción	Valor
Energía necesaria para calentarlo el FVH	$E = 103400 [kJ]$
Calor por calentamiento	$Q_c = 16.41 [kW]$
Calor total requerido en el calentamiento	$Q_{req-c} = 31.31 [kW]$

7.3.3 Selección de Batería de Calefacción Eléctrica

El sistema requiere un calor máximo de 31.31 [KW], donde los mayores requerimientos se centran en el calentamiento del aire durante la renovación del sistema y en el calentamiento del cultivo en sí. Debido a esta alta demanda, es crucial considerar un sistema de retorno de aire para

garantizar las condiciones adecuadas durante el tiempo de calentamiento establecido. Se propone que el retorno de aire solo se active cuando la temperatura del sistema caiga por debajo de los 25°C y se mantenga en funcionamiento hasta que la temperatura alcance los 28°C. Entonces, se instalarán dos baterías de calefacción. La primera se encargará principalmente de calentar el aire que entra al sistema, mientras que la segunda se encargará de calentar el aire de retorno del sistema. La necesidad del aire que ingresa al sistema debe de ser de 12.56 [kW] y por ende para el retorno debe de ser cuanto mínimo de 18.75 [kW].

Para satisfacer el calor necesario en la renovación de aire, se opta por la instalación de una batería de calefacción MBE500/150T de acuerdo con el catálogo Soler Palau. Esta batería tiene una potencia de calentamiento disponible de 15 [kW] y un diámetro de 500 [mm].

Por otro lado, para cumplir con el suministro de calor requerido en el retorno de aire, se selecciona una batería IBE-285/20T de la marca Soler Palau. Esta batería tiene una potencia de calentamiento disponible de 20 [kW] y una sección transversal de 600 mm x 295 mm.

7.3.4 Cálculo del Flujo de Aire Retorno

Partiendo que el flujo calor requerido en el retorno debe de ser cuanto mínimo de 18.75 [kW], la temperatura mínima de Bucaramanga es de 19°C y que la temperatura óptima del sistema de 28°C, se procede al cálculo del flujo volumétrico necesario.

$$Q = \dot{V}_r * \rho * C_{p_{aire}} * (T_{\infty i} - T_{\infty e}) \quad (40)$$

Donde las propiedades físicas de aire se toman de la Tabla 53

Caudal de retorno en flujo de aire. Sustituyendo se obtiene:

Tabla 53

Caudal de retorno en flujo de aire

Flujo de aire de retorno
$\dot{V}_r = 1.73 [m^3/seg] = 6228 [m^3/h]$

Figura 37

Sistema de ventilación del sistema



7.3.4.1 Diseño Ventilación del Flujo de Retorno.

Figura 38

Sistema de retorno



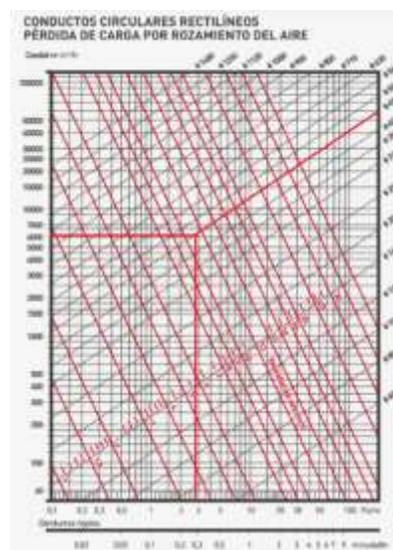
La distribución del ducto, ventilador y batería se representa en la Figura 38. Considerando que se ha seleccionado un ventilador tipo tubular, el cual estará ubicado cerca de la entrada de aire, se procederá a diseñar el ducto de admisión. El ducto estará compuesto principalmente por un codo

de sección circular que se conectará directamente al ventilador. A continuación, el ventilador descargará el aire a través de un ducto circular con un diámetro de 450 mm y una longitud aproximada de 10 m. Este ducto estará dirigido principalmente hacia la batería de calefacción. Para lograr la conexión entre la batería y el ducto, será necesario utilizar un accesorio debido a que la sección transversal de ambos elementos presenta geometrías diferentes. Finalmente, el aire será nuevamente descargado al contenedor mediante un codo de sección cuadrada.

7.3.4.2 Pérdida de carga en el ducto. Para determinar la pérdida de carga a lo largo del ducto del ducto, se tiene en cuenta los diagramas proporcionados en el catálogo de Soler Palau. Con un diámetro de ducto de 450 mm y un flujo volumétrico de aire de 6228 m³/h. De acuerdo con el diagrama proporcionado, en la figura 33, se determina que la pérdida por unidad de longitud en el ducto es aproximadamente de 0.3 [mm.c.d.a/m]. Por lo tanto, la pérdida total en el ducto sería de 3 [mm.c.d.a] aproximadamente.

Figura 39

Diagrama de caída de presión por unidad de longitud



7.3.4.3 Pérdida de carga en los accesorios, succión y descarga. La pérdida de carga depende principalmente de la presión dinámica y de los coeficientes de proporcionalidad según la geometría del accesorio (Soler Palau, 2022)

$$\Delta P = P_d \times k_v \quad (41)$$

Para calcular las pérdidas en los accesorios, es necesario considerar la presión dinámica del sistema, la cual depende principalmente de la velocidad del aire que circula por el ducto. Partiendo de salvador estrada las ecuaciones para el cálculo de la presión dinámica son la 42 y la 43 (Soler Palau, 2022), reemplazando se obtienen los resultados contenidos en la

Tabla 54.

Tabla 54

Calculo del flujo de aire de retorno

Descripción	Valor
Área transversal de la sección	$S = 0.159 [m^2]$
Flujo volumétrico de retorno	$\dot{V}_r = 1.73 [m^3/seg]$
Velocidad del flujo de retorno	$v_{Vr} = 10.8 [m/s]$
Presión dinámica	$P_d = 7.36 [mm. c. d. a]$

$$P_d = \frac{v_{Vr}^2}{16} \quad (42)$$

$$v_{Vr} = \frac{\dot{V}_r}{S} \quad (43)$$

De las gráficas del manual de ventilación soler Palau se determina los coeficientes de proporcionalidad con lo cual se calcula las pérdidas de carga esto en el Apéndice H:

Figura 40*Coefficientes de Perdida*

Descripción	Coefficiente	Perdida de carga
Admisión	$k_v = 0.49$	$\Delta P = 3.6 [mm. c. d. a]$
Codo admisión de 4 cuerpos	$k_v = 0.2$	$\Delta P = 1.5 [mm. c. d. a]$
Codo descarga de 4 cuerpos	$k_v = 0.25$	$\Delta P = 1.8 [mm. c. d. a]$
Cambio de sección	$k_v = 0.4$	$\Delta P = 3 [mm. c. d. a]$
Descarga	$k_v = 1.4$	$\Delta P = 10.3 [mm. c. d. a]$
Perdida de carga total en los accesorios		$\Delta P_{accesorios} = 20.2 [mm. c. d. a]$

Por otra parte, la batería de calefacción tiene una pérdida de $10 [mm. c. d. a]$ aproximadamente, de acuerdo con la ficha técnica de la batería. Apéndice D.

7.2.4.4 Pérdida total de carga en todos los accesorios.

$$\Delta P_{tot-accesorios} = \Delta P_{accesorios} + \Delta P_{bateria} \quad (44)$$

Tabla 55*Perdida de presión por accesorios en sistema de ventilación*

Perdida de carga total en los accesorios
$P_{ev} = 30.2 [mm. c. d. a]$

7.3.4.5 Presión estática requerida. Se determina la presión mínima que el ventilador debe generar para superar las pérdidas de carga en el ducto y los accesorios. Esta presión estática necesaria debe ser al menos igual a las pérdidas de carga del sistema.

$$P_{ev} = \Delta P_{tot-accesorios} + \Delta P_{ducto} \quad (45)$$

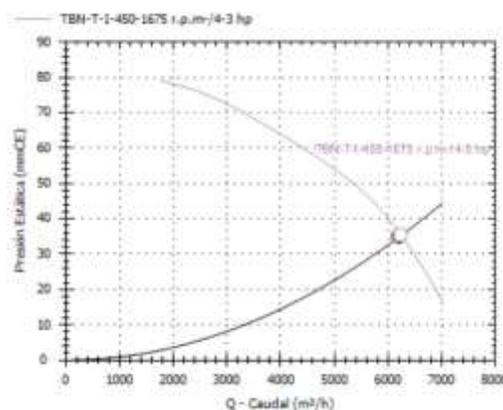
Sustituyendo se obtiene:

Tabla 56*Presión estática de ventilador***Presión estática mínima del ventilador**

$$P_{ev} = 33.2 \text{ [mm. c. d. a]}$$

De acuerdo con los requerimientos de ventilación, que son una presión mínima de trabajo $P_{ev} = 33.2 \text{ [mm. c. d. a]}$ y un flujo volumétrico $\dot{V}_r = 6228 \text{ [m}^3/\text{h]}$, se determina el punto de trabajo correspondiente. Utilizando el software Easy Vent de Soler Palau, catalogo electrónico, se selecciona el ventilador TBN-T-I-450-1675 r.p.m-/4-3 hp Figura 41.

Luego de seleccionar el ventilador y determinar el punto de trabajo anteriormente mencionado, se procede a graficar la curva del sistema junto con la curva del ventilador. Esta representación gráfica permite visualizar el nuevo punto de trabajo del sistema, el cual es capaz de satisfacer las necesidades requeridas y son muy similares a la anteriormente nombrada.

Figura 41*Curva característica ventilador y punto de funcionamiento*

Nota. Tomado de Soler & Palau. (2023). Catalogo electrónico. Soler & Palau Easy vent.

<https://easyvent.solerpalau.com/selector>

7.4 Diseño del Sistema De Fertirriego Por Nebulización

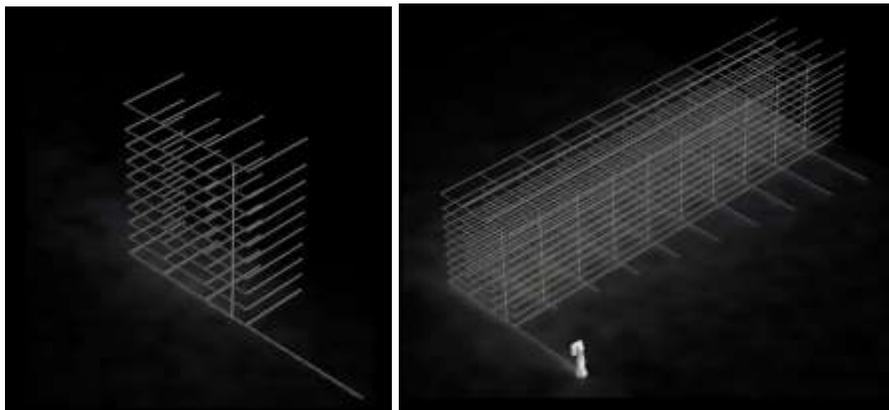
El sistema de riego debe regular el PH y la cantidad de nutrientes, presurizar el fluido y transportarlo a los nebulizadores. La mecánica de fluidos se aborda desde un análisis estacionario, considerando el fluido incompresible. El diámetro mínimo se calcula para alcanzar los niveles de presión necesarios para accionar los aspersores al tiempo.

7.4.1 Dimensionamiento predeterminado

La configuración de la tubería se divide en 9 zonas como las mostradas en la Figura 42 para cumplir con las etapas de germinación y producción. En las primeras tres zonas se riega con agua durante los primeros 3 días. A partir de la cuarta zona, se inicia la nebulización con solución nutritiva.

Figura 42

Tubería para una zona de producción



Nota. Se muestra una zona de producción individual y el sistema en conjunto de tubería y bomba.

Tabla 57*Características geométricas para el diseño de tubería: un área de producción*

Descripción	Valor	Unidad
Longitud de tubería por zona y a lo largo del container	11	m
Número de pisos	10	m
Altura máxima de tubería	2.64	m
Área Total	25.86	m ²

También, de la Tabla 33 y el modelado CAD, se obtiene un valor de área para zona de producción y longitud total de tubería en cada zona, Tabla 57. El cálculo del Volumen de solución nebulizado se hace para zonas individuales de producción, siguiendo las recomendaciones de la FAO, con un volumen de nebulización de 1.5 litros por metro cuadrado por día. Además, una dosificación de 6 aplicaciones al día:

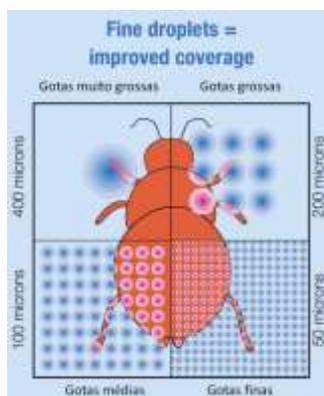
$$V = 25.86 \text{ [m}^2\text{]} * \frac{1.5}{6} \frac{\text{Lt*día}}{\text{m}^2*\text{día*aplicacion}} \quad (46)$$

$$V = 6.5 \frac{\text{Lt}}{\text{aplicacion}} \quad (47)$$

7.4.2 Selección de nebulizadores

Figura 43

Cobertura de área según gotas



Nota. Tomado de Motta, F. (12 de 03 de 2024). 3 fatores decisivos para pulverizações eficientes na agricultura. ELISYOS. <https://elysios.com.br/blog/3-fatores-decisivos-para-pulverizacoes-eficientes-na-agricultura/>

Los nebulizadores transforman un flujo presurizado en rocío. Para este cultivo, se requieren 6 litros por piso por día. La distancia entre pisos es de 25 cm y el ancho total es de 2.25 m. El caudal y la caída de presión del accesorio se usan para dimensionar el sistema de bombeo. Para lograr un buen factor de cobertura, Figura 43, se recomienda una nebulización media según (BAYER-PLM, 2014). Los catálogos electrónicos de Rivulis recomiendan los nebulizadores de bajo caudal para lograr la difusión de la masa en este tipo de geometrías. El modelo FLF (fogger low Flow) Figura 44, tiene un caudal de 5.4 lph y proporciona una niebla fina con gotas de 70 micras. En cualquier montaje se requiere una válvula de cierre para evitar el drenaje del sistema.

Figura 44*FLF Rivulis seleccionado para nebulización*

FLF 2 salidas 5.4 lph	5.4 x 2	Azul claro	Sin función antigoteo	101008234	500	4 000	
FLF 2 salidas 10.5 lph	10.5 x 2	Azul oscuro	Sin función antigoteo	101009818	500	4 000	
FLF 4 salidas 5.4 lph	5.4 x 4	Azul claro	Sin función antigoteo	101003664	500	2 000	
FLF 4 salidas 10.5 lph	10.5 x 4	Azul oscuro	Sin función antigoteo	101009819	500	2 000	

Nota. Tomado de Apéndice I**Tabla 58***Datos técnicos de aspersor*

Datos Técnicos	
Intervalo de presión de trabajo	3.5 - 5 bar
Presión (para el cálculo de caudales)	3.5 bar
Presión de sellado	1.4 bar
Requisito de filtración	100 micrón / 150 mesh

Nota. Tomado de Apéndice I

7.4.3 Diámetro De Riego Y Dimensionamiento de Tubería

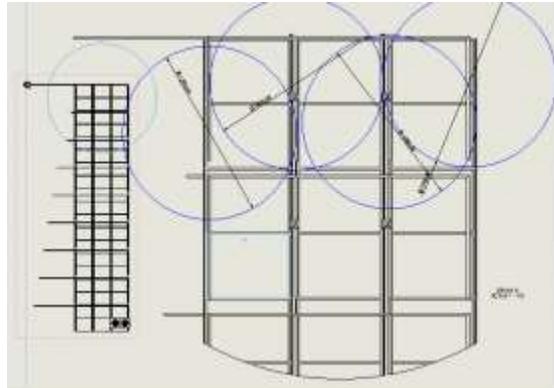
Para el montaje del sistema, se requiere diseñar una red de tubería interconectada por accesorios. Para el montaje de los aspersores, se utilizan té y codos en tramos de tubo horizontales. El principio de Bernoulli se utiliza para determinar el diámetro mínimo de tubería requerido para que los aspersores se abran al mismo tiempo. El principio establece que la energía del flujo se conserva y solo se disipa por fricción ΔP_f y pérdidas menores por accesorios ΔP_m .

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \Delta P_m + \Delta P_f \quad (48)$$

7.4.3.1 Diámetro Mínimo de la Tubería. El esquemático de la vista superior del montaje para una zona de cultivo se muestra en la Figura 45. En cada piso de estructura, se entrelazan cuatro líneas con tres nebulizadores cada una para lograr uniformidad en el riego.

Figura 45

Diagrama instalación de nebulizadores



A continuación, la ecuación de Bernoulli expresada en términos de cabeza de presión para una línea de tubería horizontal en la que no se consideran pérdidas cinemáticas, el punto referenciado como 1 es la entrada de la tubería y el punto 2, es el extremo más distante de tubería horizontalmente:

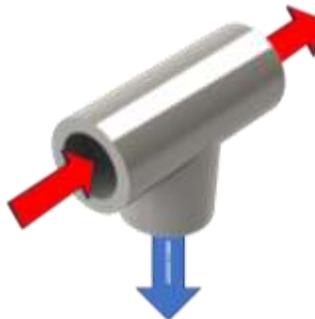
$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_1^2}{g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_2^2}{g} + h_2 + \frac{\Delta P_m + \Delta P_f}{\gamma} \quad (49)$$

$$\gamma = g * \rho \quad (50)$$

$$H_1 - H_2 - (\Delta H_m + \Delta H_f) = h_2 - h_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_2^2}{g} - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_1^2}{g} \quad (51)$$

$$H_1 - H_2 - (\Delta H_m + \Delta H_f) = 0 \quad (52)$$

$$H_1 - H_2 = \Delta H_m + \Delta H_f \quad (53)$$

Figura 46*Flujo de fluido em accesorio*

La dimensión que se busca calcular es el diámetro interno mínimo del tubo, debe cumplirse que en cada T montada a lo largo de la tubería la salida horizontal genere menor esfuerzo de presión que la presión que ejercen los nebulizadores para ser abiertos, esto con el fin de que todos se accionen al tiempo una vez el sistema en su totalidad alcance el nivel de presión necesario. La expresión para calcular el total de la caída de cabeza de presión para una de las tuberías en paralelo es:

$$\Delta H = \Delta H_m + \Delta H_f \quad (54)$$

El caudal requerido durante la ceba de la tubería para una línea de tubería horizontal en una zona de riego, que contará con 1 nebulizador, con 4 boquillas de caudal 5.4LPH, es:

$$Q_H = 1 * 5.4LPH * 4 = 21.6 LPH \left(\frac{1 m^3}{1000L} \right) \left(\frac{1H}{3600s} \right) = 6 \times 10^{-6} [m^3/s] \quad (55)$$

Se conoce la longitud de la tubería a lo largo, ancho y alto desde la estación de bombeo hasta la zona cultivo más alejada de la misma, esta supone el máximo valor de longitud que el fluido deberá recorrer y, por tanto, equivaldrá a la máxima resistencia para el análisis de pérdidas por fricción:

$$L = 10.64 + 4.240 + 2.68 = 17.55[m] \quad (56)$$

Caída de cabeza de presión por perdidas de fricción:

$$\Delta H_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * G} \quad (57)$$

$$\Delta H_f = (r) * Q^2 \quad (58)$$

$$r = \frac{(8 * f * L)}{\pi^2 * D^5 * g} \quad (59)$$

Donde:

Tabla 59

Coefficientes de cálculo ecuación de Darcy - Weisbach

Descripción	Valor
Coefficiente de perdida de carga	r
Factor de fricción de Darcy - Weisbach	f
Longitud del tramo de tubería	L
Diámetro interno de la tubería	D
Aceleración de la gravedad	g

Caída de cabeza de presión por perdidas menores en accesorios:

$$\Delta H_m = \sum K * \frac{V^2}{2 * G} \quad (60)$$

Donde:

Tabla 60

Constantes para análisis de pérdida de carga en tubería

Descripción	Valor
Constante de pérdidas del accesorio	k
Velocidad del fluido	V

La ecuación anterior tiene como notación la sumatoria pues se analiza como resistencias en serie el montaje de las Tés, seis por cada tubo horizontal. Ya acá se hace necesario el uso de herramientas de cálculo iterativas, para este propósito se emplea el EES que tiene en sus utilidades funciones que proporcionan datos para perdidas en accesorios y para el cálculo del factor de fricción:

$$K = K_{Tees\text{straight}}(R_{rel}); \quad (61)$$

$$f = \text{MoodyChart}(Re; R_{rel}) \quad (62)$$

$$R_{rel} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (63)$$

$$Re = 4 * \frac{Q_H}{\pi * D * v} \quad (64)$$

Tabla 61

Coefficientes de cálculo de mecánica de fluidos

Descripción	Valor
Numero de Reynolds	Re
Rugosidad relativa	R_{rel}
Viscosidad cinemática	ν
Coefficiente de perdida en la T en función de la rugosidad relativa	k
Rugosidad del material	ε

El resultado de la iteración da como diámetro mínimo 0.007028m (7.028mm), valor numérico para que los aspersores se accionen una vez el sistema de tuberías este totalmente cebado. Un diámetro comercial, mayor y cercano es 0.5 pulgadas y es el seleccionado para este propósito. Con este valor de diámetro las pérdidas calculadas en uno de los tramos dispuestos en paralelo son:

$$\Delta H_{piso} = 0.3187 [m. c. a.] \quad (65)$$

7.4.4 Dimensionamiento del Tanque Principal y Recirculación

La recirculación de la solución nutricional es una característica importante de los sistemas hidropónicos de producción de forraje. Para un área de cultivo de 60 litros, se recomienda un tanque de 100 litros. La cabeza neta de succión requerida es de 0.3 m.c.a., que debe ser menor a la disponible. El sistema de recirculación debe ser diseñado para garantizar la oxigenación de la solución nutricional. Esto se puede lograr instalando un aireador en el tanque principal.

7.4.4.1 Recirculación de Solución Nutritiva. Como en el prototipo construido, es válido taladrar las bandejas que se van a usar, abrirle unos pequeños agujeros para aprovechar la inclinación que se ha dispuesto en el diseño de la estructura y así hacer fluir la solución hasta un suelo inclinado y construido de láminas de PVC, con una canaleta al final de la inclinación donde puede ser impulsada por una bomba pequeña, como la usada a en la aspersión del prototipo, a continuación, se verifica la idoneidad de este dispositivo para desarrollar esta tarea:

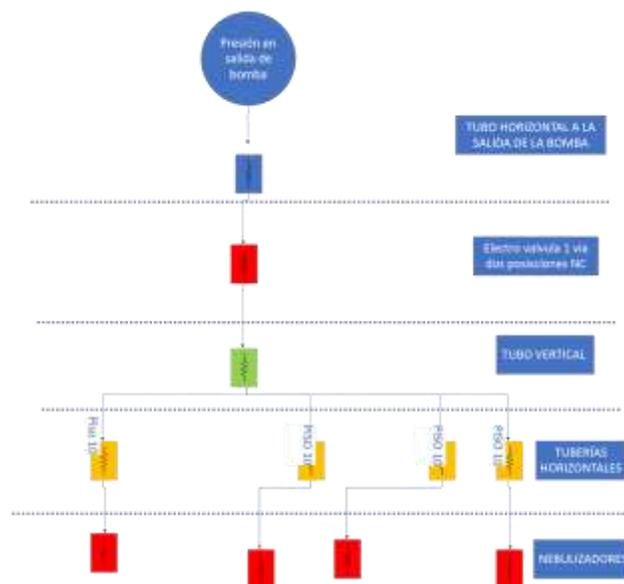
El funcionamiento de esta bomba de diafragma es de 4lpm a 0.75bares (7.64m.c.a.), el tanque cotizado del mercado tiene una altura de 81 centímetros y un volumen de 250 litros; con

un espacio de tiempo de 4 horas entre nebulización y un caudal de la bomba de 240lph, por lo tanto, se puede pensar en usar la pequeña bomba de diafragma para hacer recircular el fluido hasta el tanque de mezcla.

7.4.5 Diseño de la Estación de Bombeo

Figura 47

Diagrama de pérdidas energéticas en tuberías



7.4.5.1 Pérdidas Totales de Carga en Tubería, Estado Estacionario. Este cálculo se hace posible por la previa definición geométrica del sistema de tubos, acá se estima la presión que debe alcanzar la bomba, desde su puerto de salida al punto más lejano de la instalación.

El caudal total para diez pisos de producción y cuatro líneas de tubería por piso aplicando el principio de conservación de la masa:

$$Q_T = Q_H * 4 * 10 = 0.00024 \frac{m^3}{s} = 864lph = 14.4lpm \quad (66)$$

Conocido el caudal se hace necesario calcular la presión requerida a la salida de la bomba para accionar el sistema, por ello, se hace un análisis de perdidas energéticas por caídas de presión, el esquemático de la Figura 47 muestra las resistencias que encontrara el fluido para una zona, se muestra solo para el piso décimo, el resto de los pisos tienen el mismo montaje que hace necesario un respectivo análisis de líneas de flujo en serie y en paralelo según lo indique el análisis.

Por el tubo horizontal de salida de la bomba y por el tubo vertical se espera que circule el caudal total por lo que se duplica el valor seleccionado para el diámetro interno de la tubería horizontal, de la mecánica de fluidos se sabe que las pérdidas de presión en paralelo son las mismas en todas las líneas de flujo así dispuestas. La suma de las resistencias del esquemático de perdidas energéticas da como resultado la altura requerida de la bomba para alcanzar el punto más lejano y se determina por la siguiente expresión:

$$H_T = \Delta H_{TUBO PRINCIPAL} + \Delta H_{piso} + \Delta H_{nebulizador} \quad (67)$$

$$\Delta H_{TUBO PRINCIPAL} = \Delta H_{F_{TUBO PRINCIPAL}} + \Delta H_{ALTURA GEOMÉTRICA_{TUBO VERTICAL}} \quad (68)$$

Para las perdidas por fricción en el tubo principal donde el caudal es el total y el diámetro igual a una pulgada:

$$H_{f_{TUBO PRINCIPAL}} = 0.43 m. c. a. \quad (69)$$

$$\Delta H_{ALTURA GEOMÉTRICA_{TUBO VERTICAL}} = 2.64 m \quad (70)$$

$$\Delta H_{nebulizador} = \frac{3.5E5 pa}{\gamma_{agua@25^\circ C, 1 atm}} = 35.6 m. c. a. \quad (71)$$

$$H_T = 38.77 m. c. a. = 54 psi \quad (72)$$

Para esta aplicación de bombeo de un fluido newtoniano con posibilidades de generar diferencias de potencial suficientes como para corroer metal, se puede utilizar una bomba de diafragma similar a la usada en el prototipo, con características de presión similares, pero más capacidad de caudal. STARFLO es un fabricante que se anuncia en Alibaba, ofrece varias opciones

en cuanto a este tipo de bombas. Se selecciona la FL-35S, económica de adquisición y con un punto de funcionamiento máximo un poco por encima de las características de flujo requeridas, 20lpm a 70psi.

Otra de las necesidades que se deben cubrir con el diseño de este subsistema, es que este en capacidad de bombear solución nutritiva o agua según sea requerido, por lo que aguas arriba de la bomba es necesario instalar una válvula de 2 vías dos posiciones o de dos bobinas como se anuncia en (mercadoLibre, 2022), con accionamiento eléctrico y centro cerrado, por la similitud de características con una lavadora se indaga sobre las partes que estas poseen, pues es un mercado comercial en el país, para seleccionar el flujo se selecciona una válvula para lavadora Haceb D1300. Siendo 9 las zonas de producción se hacen necesario individualizar las válvulas de dirección ubicadas aguas debajo de la bomba con válvula de dos posiciones y una vía, que son anunciadas en el mercado como válvula de una bobina, (mercadoLibre, 2023).

Figura 48

Válvulas para direccionamiento de bombeo



Nota. A la izquierda la válvula 2/1 y a la derecha 3/2.

7.4.5.2 Cálculo del NPSH Disponible. La expresión para este cálculo es la siguiente:

$$NPSH_d = h_a + h_{st} - h_{vpa} - h_{fs} \quad (73)$$

Tabla 62

Columnas de presión y NPSH_d

Descripción	Variable
Presión absoluta (ATMOSFÉRICA)	h_a
Presión hidrostática por altura	h_{st}
Presión de vapor	h_{vpa}
Presiones perdidas por fricción	h_{fs}

En Bucaramanga, la presión atmosférica es de 9,23 m.c.a. A 25°C, la presión de vapor es de 0,325 m.c.a. Las pérdidas por fricción en una tubería de media pulgada de 0,5 metros de longitud y una válvula de direccionamiento son de 3,1 m.c.a. Sin tener en cuenta la presión estática por altura o nivel de tanque, la cabeza neta de succión disponible es de 5,81 m.c.a., mayor que la requerida en el puerto de succión de la bomba. Se puede usar un indicador de nivel conectado al sistema de control para garantizar que la bomba se apague antes de que el tanque quede vacío.

7.5 Diseño del sistema de iluminación

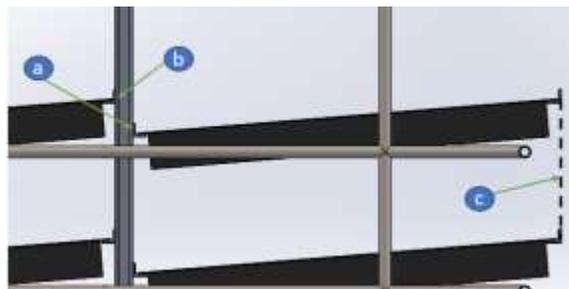
El sistema de iluminación se basa en cintas LED de 1650 micro vatios por metro. Estas cintas se instalarán pegadas a la estructura, en los perfiles tipo L, de manera horizontal. Para garantizar una iluminación uniforme, las cintas se instalarán en tramos de 20 cm frente a cada bandeja. El área de una bandeja es de 0.42m², por lo que su requerimiento individual es de 632 micro vatios. Por lo tanto, se necesitan 40 cm de cinta por bandeja, lo que equivale a un total de 156 metros para las 390 bandejas del sistema que deben de estar iluminadas debido a que se encuentran en los últimos 6 días del cultivo.

7.5.1 Cantidad de cinta de iluminación necesaria

Se revisa el montaje propuesto para la estructura y se decide que las cintas de iluminación se deben instalar pegadas a la estructura, en los perfiles tipo L, en la cara lateral del perfil, externa o de mayor longitud, es decir, de manera horizontal. Esto se debe a que esta posición ofrece una ventaja para la geometría de la luz. Además, las columnas, que también forman parte de la estructura, están muy separadas, lo que dificultaría garantizar una iluminación uniforme sobre el área de cultivo. Como se indagó en el diseño detallado del prototipo, una cinta LED tiene la capacidad de emitir 1650 micro vatios por metro. Además, según el diseño de la estructura, la separación entre las bandejas es prácticamente nula, y la separación entre zonas de producción es de 2 bandejas, con 6 bandejas por piso en cada zona. El área que abarca una bandeja es de 0.42m^2 , por lo que su requerimiento individual es de 632 micro vatios. Se necesitan 40 cm de cinta por bandeja, sumando un total de 156 metros para las 390 bandejas que se deben instalar en tramos de 20 cm frente a cada bandeja en las caras a, b y c descritas Figura 49.

Figura 49

Ubicación de cintas de iluminación en estructura



Nota. Caras a b y c seleccionadas para la instalación de las cintas; c a 3 cm por debajo de b y en la pared del containe

7.5.2 *Potencia de consumo*

La cinta de iluminación es un dispositivo conformado por leds en paralelo, 66 por metro, a continuación, se hacen los cálculos para el montaje eléctrico de los tramos que debe realizarse en paralelo a 12v. Cuando los dispositivos están conectados en paralelo, la tensión en cada dispositivo es la misma que la tensión de la fuente de alimentación (en este caso, 12 voltios). La corriente total consumida por los dispositivos en paralelo es la suma de las corrientes individuales de cada dispositivo.

$$Potencia(W) = Corriente(A) \times Tensión(V) \quad (74)$$

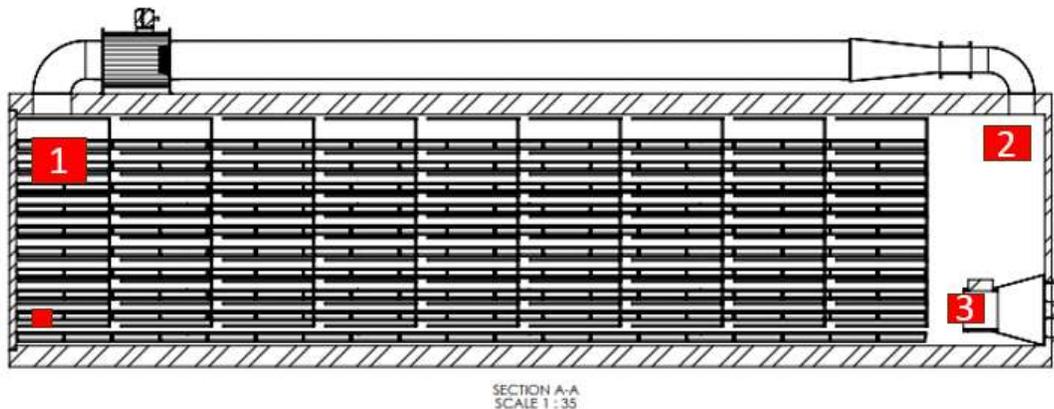
Dado que la potencia de consumo por metro de la cinta es de 8 vatios a 12 voltios, 1.6 vatios para cada tramo de 20cm, 200 vatios serán los consumidos en total para un montaje de los tramos de iluminación en paralelo.

7.6 **Diseño de sistema de control**

El sistema de control de los sistemas hidropónicos ha empezado a desarrollarse. Es necesario comparar las necesidades previstas para el sistema final con las que se han suplido en la experimentación.

Figura 50

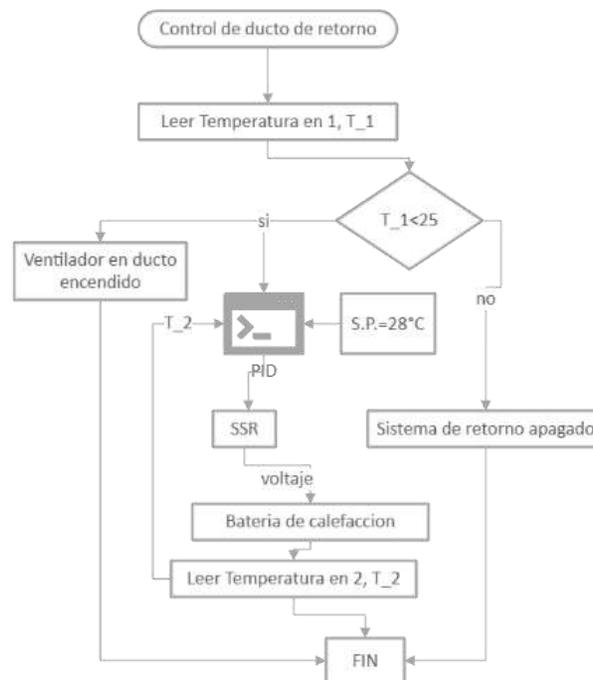
Ubicación de muestreo de temperatura



Nota. El punto 1 es la entrada al ducto de retorno; El punto 2 es la salida del ducto de retorno; El punto 3 es la salida del calentador de renovación.

7.6.1 Control de calefacción

El sistema de calefacción del sistema de 500 kg diarios debe controlar una mayor potencia que el prototipo. Para ello, se utiliza un montaje de control eléctrico industrial con variación de frecuencia. El control se realiza de forma individual para cada batería de calefacción, garantizando que la temperatura a la salida del calentador de renovación y a la entrada y salida del sistema de retorno esté entre 25 y 28°C. Para la batería del subsistema de retorno, el control se activa cuando la temperatura en la zona de la entrada del ducto es inferior a 25°C. En este caso, el SetPoint a la salida del ducto es el mismo que para la batería de renovación. El fabricante del equipo ofrece accesorios para ampliar la potencia y regularla, además de sondas de temperatura para los ductos y un controlador adecuado. Los dispositivos seleccionados para el control de la temperatura a través de las baterías de calefacción se muestran en el Apéndice H.

Figura 51*Arquitectura algoritmo de control en sistema de retorno*

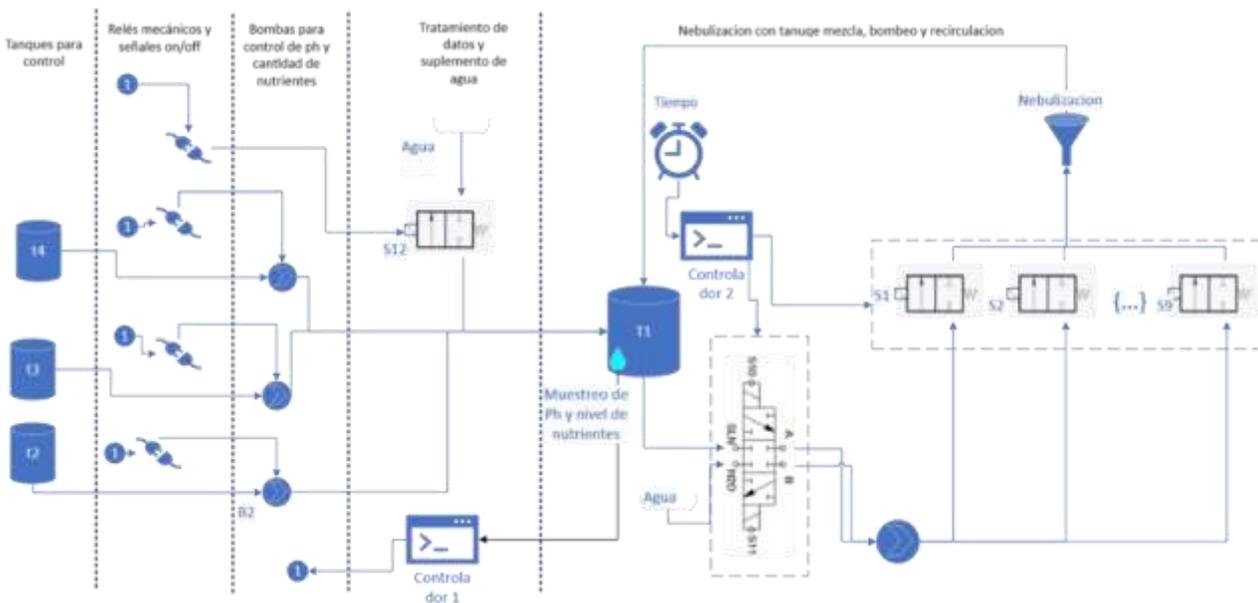
7.6.2 Control de bombeo y calidad de solución nutritiva

El prototipo cumplió el objetivo de control y producción en un sistema de 500 kg. Se puede replicar utilizando Arduino como sistema de control embebido. En un sistema más grande, se consideran las electroválvulas para ahorrar costos, especialmente en la implementación de válvulas de accionamiento eléctrico para dirigir el flujo de la solución nutritiva. Para un sistema de 9 zonas de cultivo, se requieren 9 electroválvulas, controladas por solenoides y relés respectivos. Estas electroválvulas se activan según la zona de producción y durante los 6 días designados para la nebulización. Además, se instalan 2 electroválvulas en la succión de la bomba para determinar si se debe bombear agua o solución nutritiva. El sistema de nebulización, control de nutrientes y

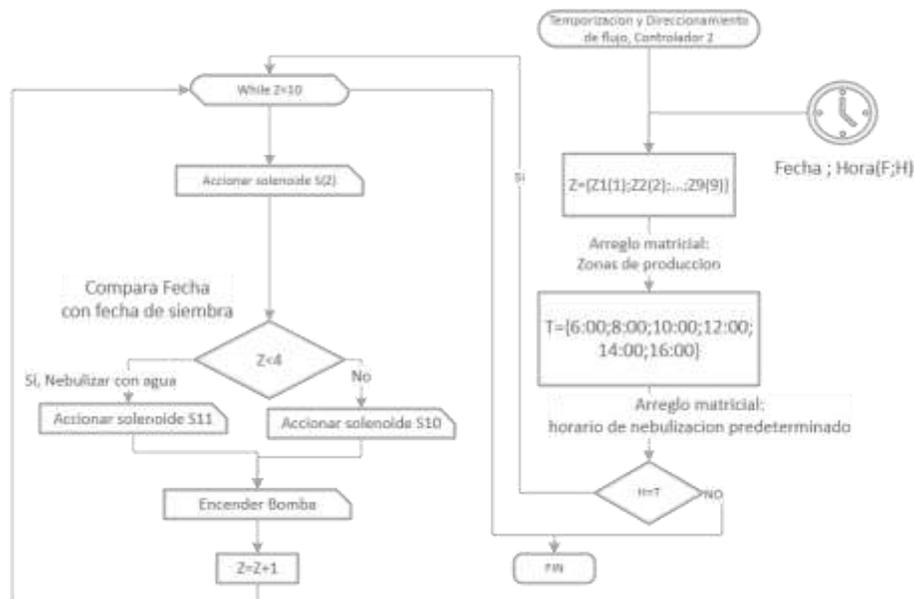
recirculación se presenta en el flujograma de la Figura 52.

Figura 52

P&ID de la nebulización y control de parámetros de la solución nutritiva



Para la arquitectura de software del controlador uno se plantea el flujo grama presente en la Figura 10; para la arquitectura de software del controlador 2 se plantea el flujo grama plasmado en la Figura 53.

Figura 53*Algoritmo para controlador 2*

7.6.3 Control de iluminación

Siendo este también un sistema On/Off con temporización se puede añadir al controlador 2 encargado del direccionamiento y temporización de la nebulización. Se trata de cerrar y abrir el paso de corriente en un relé a determinada hora para así, encender y apagar la iluminación que va desde la zona 3 a la zona 9, usando un relé, de preferencia mecánico, el algoritmo de control necesario es entonces el mismo de la Figura 10.

7.6.4 Control de potencia eléctrica

Durante la elaboración detallada del diseño del sistema, se ha decidido optar por la selección de algunos componentes de corriente continua. Esto conllevará a la necesidad de incorporar dispositivos de electrónica de potencia para la conversión de AC a DC, (Kim, 2023).

Por otro lado, en relación con componentes como las baterías de calefacción, se dispone de datos sobre su consumo energético, lo que podría hacer necesario el uso de totalizadores y

dispositivos de protección, como interruptores (breakers). A continuación, se detallan todos los dispositivos seleccionados.

7.6.5 Conversión AC DC

Esta conversión electrónica de potencia juega un papel protagónico pues los dispositivos que a continuación se van a seleccionar son dispositivos en capacidad de transformar la corriente continua a corriente alterna para alimentar los equipos que lo requieran. La corriente requerida para la iluminación es de 17 amperios a 12 V. Para la bomba principal del sistema de nebulización, se necesitan 20 A, también a 12 V. Además, están las bombas de regulación, seleccionadas como las utilizadas en el prototipo, Figura 15. Estas bombas, con un consumo de 45 W, equivalen a 3.5 amperios a 12 voltios. En consecuencia, se elige una fuente de conversión de 50 amperios a 12 voltios, (MercadoLibre, 2023). Para terminar, también para los controladores y algunos relés se necesita alimentación de 5v, dada la similitud con el prototipo se selecciona una fuente de 20amperios, a 5v, (MeercadoLibre, 2023).

8. Viabilidad técnico-económica

La viabilidad de un proyecto se evalúa en dos ejes: técnico y financiero. El eje técnico analiza la validez del proyecto y la capacidad de la empresa desarrollarlo, mientras que el eje financiero analiza los costos y beneficios del proyecto.

8.1 Viabilidad técnica

Para evaluar la viabilidad técnica de un proyecto, se debe determinar si cumple con la función para la que fue concebido. En este caso, el objetivo es disminuir los costos de suplementación nutricional en la crianza de bovinos. El costo de alimentación se calcula con la ecuación 75, la suplementación es necesaria para compensar las deficiencias nutricionales de los alimentos ricos en materia seca.

$$C = C_{MS} + C_{SN} \quad (75)$$

C_{MS} : Costo materia seca

C_{SN} : Costo de suplementación nutricional

El forraje verde hidropónico puede reducir estos costos al actuar como un suplemento nutricional de bajo costo.

8.1.1 FVH en dietas de bovinos

El forraje verde hidropónico (FVH) puede usarse para alimentar bovinos de engorde bajo condiciones de pastoreo. El FVH es una buena fuente de nutrientes y minerales, y es fácil de digerir. La FAO encontró que el mejor caso de estudio es cuando se sustituye el 50% del suplemento nutricional por FVH, esto desde un punto de vista económico, relacionado directamente con la efectividad de la dieta, la de este caso en particular mostró ventaja para hacer engordar los terneros.

Tabla 63

Sustitución de suplemento nutricional en dieta de bovinos

Nivel de Sustitución	Aumento Total por Animal (Kg)
0%	37,99
50%	39,25
100%	29,93

Nota. Tomado de FAO. (2001). *Manual Tecnico Forraje Verde Hidroponico*. Santiago, Chile: Oficina Regional De La Fao Para Para America Y El Caribe.

8.2 Viabilidad económica

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se utilizó el modelo de retorno de inversión PDB. Se compararon los costos de la dieta tradicional con los de la dieta modificada, que incluye FVH.

8.2.1 Costeo de la inversión inicial

8.2.2 Costo de operación del sistema

8.2.2.1 Costeo de consumo de energía. Se ha revisado la proyección del costo de la energía según los históricos presentados en la página web de la empresa electrificadora de Santander. Un sistema que solo considera la transferencia de calor por aire tendrá un consumo medio de 30 kW durante el día y 22 kW durante la noche. Este consumo incluye la calefacción, la iluminación y el sistema de bombeo.

Figura 54

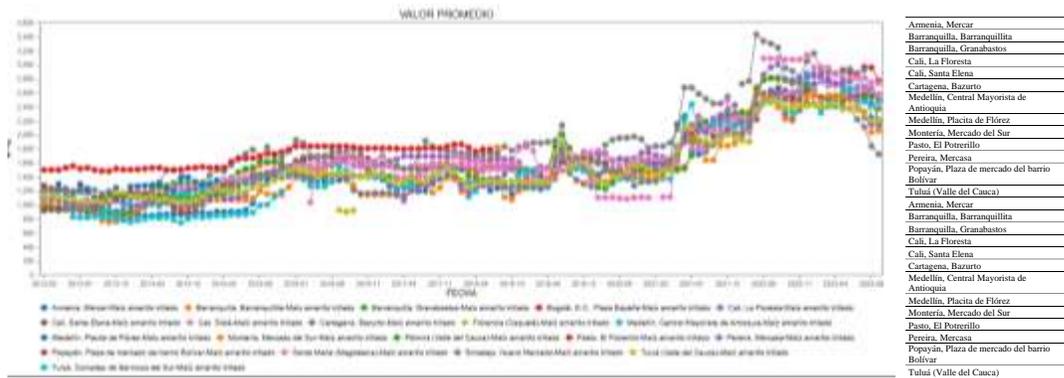
Gráfico de Histórico y proyección de costo de energía



Nota. Tomado de ESSA. (2023). Consulta de tarifas. ESSA. <https://www.essa.com.co/site/mi-factura/formula-tarifaria-y-tarifas/consultar-tarifas#2023-1513>

Figura 55

Grafica de precios promedio de maíz en diferentes abastos del país



Nota. Tomado de SIPSA DANE. (2023). SIPSA Consulta de precios mayoristas. DANE. <https://apps.dane.gov.co/pentaho/api/repos/%3Apublic%3ASIPSA%3ASIPSAV17.wcdf/generatedContent>

t

8.2.2.2 Costeo del maíz como materia prima. Según la Figura 55, el precio del kilo de maíz trillado aumentó una media de 500 pesos colombianos cada 5 años desde el año 2012 al 2022. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los datos recopilados pueden verse afectados por la emergencia sanitaria. Por lo tanto, se toma el último valor registrado en la Figura 56 como promedio, que es de 2200 pesos colombianos por kilo para el periodo 2020-2025.

Figura 56

Promedios de precios del maíz en centros abastos del país



Figura 57*Sal Somex Ceba*

Nota. Tomado de SOMEX. (2023). TIERRAGRO SAL SOMEX. TIERRAGRO. <https://www.tierragro.com/collections/somex/products/sal-somex-ceba-10-50-5-5-40-kl-somex-bovinos>

8.2.3 Recuperación de la inversión

Este tiempo se mide a partir de que el proyecto ha alcanzado completa estabilidad y se calcula con la siguiente formulación:

$$T_{dias} = \frac{C_{inversionInicial}}{V_{AhorradoDía}} \quad (76)$$

$$V_{AhorradoDía} = C_{produccionFVHDía} - C_{500KgSalMineralizada} \quad (77)$$

- T_{dias} : Tiempo de recuperación de la inversión en días.
- $C_{inversionInicial}$: Costo de la inversión de inicial
- $V_{AhorradoDía}$: Valor ahorrado cada día
- $C_{produccionFVHDía}$: Costo de producción de los 500Kg de FVH o también llamados costos

de operación, calculados en el apartado anterior.

$C_{500KgSalMineralizada}$: Costo de compra de 500Kg de sal mineralizada.

$$Inversion\ inicial = 111'409.434 \quad (78)$$

Tabla 64

Recuperación de la inversión

	Consumo Diario	Costo unitario	Costos diarios
Energía	630Kw-h	\$ 935	\$ 589.050,00
Maíz	62,5 Kg	\$ 2.200	\$ 137.500
500Kg FVH(Suma)			\$ 726.550,00
500Kg Sal CEBA			\$ 1.883.750,00
Días de recuperación			112

El estudio de costos de la producción de 500 kg de carne bovina en un sistema a gran escala encontró que el costo de la sal mineralizada es de \$132.400 pesos colombianos por 40 kg. Si se reemplaza la sal mineralizada por la solución nutricional desarrollada en el proyecto, se ahorraría \$662.000 pesos colombianos por día. Por lo tanto, la inversión se recuperaría en 112 días, lo cual es un tiempo relativamente corto en comparación con los tiempos de producción de los bovinos.

9. Conclusiones

Se desarrolló un sistema automatizado para la producción de forraje verde hidropónico de maíz, cumpliendo con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica en cuanto a la conservación

de recursos naturales, uso racional de energía y fomento del espíritu emprendedor encaminado a ser sostenibles y rentables.

Se diseñó un sistema de producción de forraje verde hidropónico automatizado que cumple con las especificaciones: Es para producción de forraje de maíz. Capacidad de producción entre 500 y 550 kg de forraje por día. Sistema de iluminación con espectro óptimo para la producción de biomasa. Sistema de fertirrigación por nebulización. Estructura de soporte para los elementos del sistema.

Se construyó un prototipo funcional del sistema para la experimentación y evaluación. Poniendo a prueba los algoritmos ideados para el control de los actuadores y los parámetros ambientales necesarios para obtener un rendimiento de 7,8 kilogramos de forraje producidos por kilogramo de semilla sembrado en 9 días,

Se realizó una evaluación técnico-económica de la implementación del sistema. Se considera un proyecto viable para inversionistas del sector agroindustrial con necesidad diaria de una tonelada de suplementación dietaria para bovinos de engorde, con un tiempo aproximado de recuperación de la inversión de ciento doce días, y un poco más de un millón de pesos colombianos ahorrados al día, lo que representa una reducción del 60% del costo total del suplemento dietario.

10. Recomendaciones

Se recomienda establecer un programa de capacitación para los empleados encargados del sistema de cultivo en el contenedor. Esto les permitirá operar el sistema de manera efectiva y

comprender la importancia de aplicar prácticas de cultivo adecuadas. La capacitación debe abordar tanto el uso del sistema incluyendo las mejores prácticas de cultivo, lo que garantizará un rendimiento óptimo y reducirá el riesgo de enfermedades y plagas.

Se recomienda desarrollar un programa de capacitación integral para los ganaderos sobre el uso del sistema de producción de forraje hidropónico, en donde se aborden con claridad las ventajas de la implementación del sistema, esto como parte de la apertura del mercado en un sector que se mantiene tradicional en su manera de producción.

Bibliografía

- Gómez Burneo, J. (2008). *Evaluación de la producción y la composición nutricional de tres tipos diferentes de forraje hidropónico*. Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/1d073197-5398-4a8b-b4f5-a841f780daa8/content>
- AGRITOM. (10 de 12 de 2022). [Imagen adjunta]. [Actualización de estado]. Instagram. https://www.instagram.com/p/Ca15dH_IoaU/
- ALIBABA. (13 de junio de 2020). *STARFLO-mini bomba de agua salada de flujo alto, FL-35S, 12V, 70PSI, 20LPM, similar a la bomba de lavado de cubierta de agua salada*. O ALIBABA. https://spanish.alibaba.com/p-detail/STARFLO-1600077041208.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.389816d6mJHO3r&s=p
- ALIEXPRESS. (2022). https://es.aliexpress.com/item/1005005042040009.html?spm=a2g0o.detail.100009.3.45937ae01ubN6B&gps-id=pcDetailLeftTopSell&scm=1007.13482.271138.0&scm_id=1007.13482.271138.0&scm-url=1007.13482.271138.0&pvid=6af09e43-383f-4b33-a86a-c50fa7fd1cc4&_t=gps-id%3Ap
- BAYER-PLM. (2014). Diccionario de especies agroquímicas. En *Diccionario de especies agroquímicas* (Vol. 24, págs. 548-559). PLM S.A. doi:978-958-8807-41-6
- Bedolla-Torres , M., Espinosa, A., Palacios, O., Choix, F., Ascencio Valle, F., López Aguilar, D., . . . Ortega Pérez, R. (2015). La irrigación con levaduras incrementa el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de maíz. (R. A. Microbiología, Ed.) 47(3), 236-244. <https://www.redalyc.org/pdf/2130/213041741011.pdf>
- Beer, F., RUSSELL, J., DEWOLF, J., & MAZUREK, D. (2009). Mecanica de solidos. En M. d.

- solidos, *Beer* (pág. Apendice D Pg.792). México: McGrawHill.
- Beltrano, J., & Gimenez, D. (2015). *Cultivo en hidroponía*. La Plata Argentina: Universidad de la plata. doi:978-950-34-1258-9
- Benegas, R., & Maria , D. (2014). La radiación solar y las plantas: un delicado equilibrio. *INTA DIGITAL*, 6. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/15433>
- Burgos, G., Contreras, C., Portilla, S., & Rojas , A. (2018). Valorización económico nutricional como criterio de selección de especies para la producción de Forraje Verde Hidropónico (FVH). *La Serena: Informativo INIA Intihuasi no. 79.*, 49. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/4819>
- C..B. , L. (1994). Hydraulics for pipeliners. En L. C..B., *Hydraulics for pipeliners* (págs. 57-78). Houston, Texas: GULF.
- California Lightworks Argentina. (14 de marzo de 2020). *Espectro de luz y crecimiento de plantas*. CALIFORNIA LIGHTWORKS ARGENTINA: http://www.californialightworks.com.ar/espectro-de-luz-y-crecimiento-de-plantas_4_22582_2327_1.html
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). Transferencia de calor y masa. En Y. Cengel, & A. Ghajar, *Cengel, Yunus; Ghajar, Afshin;* (págs. Capitulo 9-Conveccion Natural). Mexico: McGrawHill.
- Contexto Ganadero. (6 de junio de 2016). *Forraje verde hidropónico, una alternativa para conservar comida en épocas críticas*. Contexto Ganadero. <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/forraje-verde-hidroponico-una-alternativa-para-conservar-comida-en-epocas>
- David Varón, D., Balart Gimeno, R., Ferrandiz Bou, S., & García Sanoguera, D. (2013).

PROPIEDADES Y PROCESADO DE LA SILICONA LÍQUIDA INYECTAD.
3CIENCIA TECNOLOGÍAS, 14. <https://3ciencias.com/wp-content/uploads/2013/02/SILICONA.pdf>

Decreto 1840. (1994 de agosto de 1994). [*Con fuerza de ley*]. Por medio del cual se expide el código de Sistema unico de informacion normativa:
<https://www.colombiaproductiva.com/ptp-capacita/publicaciones/sectoriales/publicaciones-carne-bovina/publicaciones-carne-bovina#:~:text=Decreto%201840%20de%203%20de%20agosto%20de%201994,afectar%20la%20ganader%C3%ADa%20nacional.%20Ver%20archivo%20en%20PDF>

ELEUSIS Internacional S.A.S. (s.f.). *Forraje Verde Hidropónico*. Germinado Verde. Invernadero.
http://www.eleusis.es/fhv_sistemas_invernadero.htm

ELEUSIS Internacional S.A.S. (s.f.). *Forraje Verde Hidropónico*. Módulos de bandejas combinados. http://www.eleusis.es/fhv_sistemas_bandejas_mc.htm

ESSA. (2023). *Consulta de tarifas*. <https://www.essa.com.co/site/mi-factura/formula-tarifaria-y-tarifas/consultar-tarifas#2023-1513>

FAO. (1997). *La Huerta Hidroponica Popular*. Santiago, Chile.

FAO. (2001). *Manual Tecnico Forraje Verde Hidroponico*. Santiago, Chile: Oficina Regional De La Fao Para Para America Y El Caribe.

FAO. (2003). *Manual Tecnico La Huerta Hidroponica Popular*. Santiago, Chile: Organizacion De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentacion.

FAO. (2006). *Mejoramamiento de la disponibilidad de alimentos en los Centros de Desarrollo Infantil del INNFA*. <https://www.fao.org/3/ah472s/ah472s00.htm>

- French, J., & Karen, M. (2014). Innovation in agriculture: a key process for sustainable development. *Instituto interamericano de cooperacion para la agricultura IICA*, 20. Instituto Interame: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/2607>
- Ganadería Intensiva Vs. Ganadería Extensiva*. (14 de 06 de 20114). Contexto Ganadero: <https://www.contextoganadero.com/blog/ganaderia-intensiva-vs-ganaderia-extensiva-0>
- García Mahecha, C. (10 de Enero de 2023). Esto es lo que un trabajador de salario mínimo invierte en la canasta básica. *EL TIEMPO*, pág. 3. <https://www.eltiempo.com/economia/finanzas-personales/cuanto-le-vale-la-canasta-basica-de-alimentos-a-un-trabajador-en-colombia-737031>
- GICODA. (2022). *CATALOGOS ELECTRONICOS*. GICODA: <https://gicoda.com/wp-content/uploads/2019/04/catalogogicodaes.pdf>
- Gonzalo, B., Contreras S., C., Portilla R., S., & Rojas M., A. (2018). Valorización económico nutricional como criterio de selección de especies para la producción de Forraje Verde Hidropónico (FVH) [en línea]. *La Serena: Informativo INIA Intihuasi*, 79. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/4819>
- Gunasekaran, S. V. (2022). Effect on the Growth and Photosynthetic Characteristics of Anthurium andreanum ('Pink Champion', 'Alabama') under Hydroponic Culture by Different LED Light Spectra. *PROQUEST*, 7. doi:<https://doi.org/10.1007/s13165-021-00373-z>
- Hamrock, B., Jacobson, B., & Schmíd, S. (2000). Elementos de máquinas. En B. Hamrock, B. Jacobson, & S. Schmíd, *Elementos de máquinas* (págs. 701-705). México: McGraw-HILL.
- Hidroponia industrial. (9 de diciembre de 2022). *BANDEJA DE FVH 56X75X7CM*. Hidroponia industrial: <https://hidroponiaindustrial.com/producto/bandeja-de-forraje-verde->

hidroponico-60x80x2cm/

HydroEnviroment. (12 de noviembre de 2022). *Ventilacion en un invernadero*. HydroEnviroment:

https://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=429

IDEAM. (2015). *CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y*

MUNICIPIOS TURÍSTICOS. BOGOTÁ: IDEAM. [http://www.ideam.gov.co/documents/](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc)

[21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc)

[C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc)

Incropera, F., & De Witt, D. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. En F. Incropera, & D.

De Witt, *Fundamentos de transferencia de calor 4Ta ED* (pág. Capitulo 7). MEXICO:

PEARSON EDUCATION.

Instituto Colombiano Agropecuario, Resolución 61252. (2020). Requisitos y el procedimiento para

el registro de los fabricantes e importadores de alimentos para animales, así como los

requisitos y el procedimiento para el registro de alimentos para animales y se dictan otras

disposiciones. [https://www.ica.gov.co/getattachment/f7b59ff6-7bfc-477a-8110-40a14b80](https://www.ica.gov.co/getattachment/f7b59ff6-7bfc-477a-8110-40a14b80bd4e/2020R61252.aspx)

[bd4e/2020R61252.aspx](https://www.ica.gov.co/getattachment/f7b59ff6-7bfc-477a-8110-40a14b80bd4e/2020R61252.aspx)

Kanthal. (02 de febrero de 2020). *NIKROTHAL Resistance heating wire and resistance wire*.

Kanthal.com. [https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-](https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/nikrothal-20/)

[heating-wire-and-resistance-wire/nikrothal-20/](https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/nikrothal-20/)

Kim, K. (2023). Power Electronics Introduction - Converter Types. Ulsan, South Korea.

[https://www.youtube.com/watch?v=fB11_tedS8M&list=PLmK1EnKxphinxBub5hL0ZoJ](https://www.youtube.com/watch?v=fB11_tedS8M&list=PLmK1EnKxphinxBub5hL0ZoJXWoqjkGE19&index=2)

[XWoqjkGE19&index=2](https://www.youtube.com/watch?v=fB11_tedS8M&list=PLmK1EnKxphinxBub5hL0ZoJXWoqjkGE19&index=2)

López Aguilar, R., Murillo Amador, B., & Rodríguez Quezada, G. (2009). El forraje verde

- hidropónico (FVH): una alternativa de producción de alimento para el ganado en. (Interiencia, Ed.) 34(2), 121-126. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33934207.pdf>
- Lou, Y., Huang, W., Zheng, Z., & Wang, S. (2021). Thermal resistance and optical performance of SMD LEDs with traditional package and chip scale package. *Conference on Photonic MEMS, THz MEMS and Metamaterials*, 8. doi:10.1117/12.2603562
- Martha H. Bedolla-Torres a, A. P. (2015). La irrigación con levaduras incrementa el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de maíz. *REVISTA ARGENTINA DE MICROBIOLOGIA*, 10. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2130/213041741011.pdf>
- MeercadoLibre. (2023). *Fuente Suichada Industrial 5v 20a S-100-5 Sompom*. MeercadoLibre: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-537346095-fuente-suichada-industrial-5v-20a-s-100-5-sompom-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=9bc4d93d-90cf-48cf-a445-cbd93d5e5ef4
- mercadoLibre. (10 de junio de 2022). *Válvula Entrada De Agua Llenado Genérica Lavadora LG*. mercadoLibre: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-2024583870-valvula-entrada-de-agua-llenado-generica-lavadora-lg-_JM?variation=#reco_item_pos=0&reco_backend=pads-retrieval-model&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-pads-up&reco_id=bbacdd59-8fd3-4c26-8706-c
- MercadoLibre. (2023). *Fuente De Poder Metalica Para Cinta Led 50 Amp 12v*. MercadoLibre: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-593165716-fuente-de-poder-metalica-para-cinta-led-50-amp-12v-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=d10a58a5-cbef-43a4-b18b-673cb18a1406

- mercadoLibre. (12 de mayo de 2023). *Válvula De Llenado Sencilla LG Lavadora Digital 1 Entrada*. mercadoLibre: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1031464808-valvula-de-llenado-sencilla-lg-lavadora-digital-1-entrada-_JM#position=15&search_layout=stack&type=item&tracking_id=92b906af-eef7-4250-b8a3-a7b0c0955f46
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 0883 de 2018. (2018). Resolución 0883 de 2018. *Normativa legal colombiana*, 14. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0883-de-2018/#:~:text=Resoluci%C3%B3n%200883%20de%202018%20Ver%20documento%20Mayo%2018,de%20aguas%20marinas%2C%20y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones%C2%BB>.
- Motta, F. (12 de 03 de 2024). *3 fatores decisivos para pulverizações eficientes na agricultura*. Obtenido de ELISYOS. <https://elysios.com.br/blog/3-fatores-decisivos-para-pulverizacoes-eficientes-na-agricultura/>
- Ogata, K. (1993). Ingeniería de control moderna. En K. Ogata, *Ingeniería de control moderna* (págs. 634-647). México: PRENTICE HALL.
- Oviedo Joya, J. J., & Sandoval Angarita, D. E. (2019). *Evaluacion de los efectos de inclusion de forraje verde hidropónico de maíz en las etapas de levante y ceba de conejos macho de la raza Nueva Zalanda*. MÁLAGA: Universidad Industrial de Santander IPRED. Programa de zootecnia. Recuperado el 2021 de Diciembre de 12
- Oviedo Joya, J., & Sandoval Angarita, D. (2019). *Evaluacion de los efectos de la inclusion de forraje verde hidropónico de maíz en las etapas de levante y ceba en conejos machos de*

- la raza nueva zelanda (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.* <https://noesis.uis.edu.co/items/838b3b0a-00b2-430e-b263-371e4b7438f9>
- PALOMINO VELASQUEZ, K. (2009). *Riego Por Aspersión / Karen Palomino Velasquez.* Macro: Lima.
- PALOMINO VELASQUEZ, K. (2009). *Riego Por Goteo / Karen Palomino Velasquez.* Lima: Macro.
- Plasticbages Indsutrial S.L. (12 de Diciembre de 2019). *Características Técnicas Del Pvc.* <http://www.plasticbages.com/caracteristicaspvc.html>
- pvcglobalconstructions. (13 de junio de 2020). *pvcglobalconstructions.com.* Cielo Raso Pvc: <https://www.pvcglobalconstructions.com/product/laminas-cielo-raso-pvc/>
- Qingzhou Rainbow Modern Agriculture Development Co., Ltd. (2021). *Granja invernadero contenedor hierba hidropónica.* ALIBABA: <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Hydroponic-1600487290781.html?spm=a2700.picsearch.offer-list.14.78965f93qh1GuR>
- Raziye , İ., & Emin , G. (2008). Thermal propieties of some oily seeds. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science)*, 7. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/119120#:~:text=The%20average%20specific%20heat%20values%20varied%20from%201.4868,and%20from%200.8649%20to%201.9302%20kJ%20Fkg%EF%82%B0C%20for%20sunflower.>
- Reyes, P. A., Rayentué, C. A.-I., & Pinto, A. T. (2020). Construcción de estructura de madera para producir forraje verde hidropónico. *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES*

- AGROPECUARIAS, INFORMATIVO N° 37, AÑO 2020, 8.*
<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/67272/NR42473.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rico, G. (26 de enero de 2017). La ganadería extensiva está acabando con los bosques en Colombia. *El espectador*. Recuperado el 01 de Diciembre de 2022, de <https://blogs.elespectador.com/medio-ambiente/mongabay-latam/la-ganaderia-extensiva-esta-acabando-los-bosques-colombia>
- Rivera E., D. (1999). Internal Model Control: A Comprehensive View. *Department of Chemical, Bio and Materials Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona (85287-6006)*, 23.
- Sanchez, A. (11 de febrero de 2020). *Argentinos producen forraje verde hidropónico para alimentación animal*. INFOCAMPO: Noticias del campo en el momento justo.: <https://www.infocampo.com.ar/argentinos-producen-forraje-verde-hidroponico-para-alimentacion-animal/>
- Sánchez, W. (13 de Marzo de 2018). *ABCRURAL PARAGUAY*. Obtenido de Forraje Hidropónico: https://www.youtube.com/watch?v=_AwdkuSzGeQ&t=288s
- SIPSA DANE. (2023). *SIPSA Consulta de precios mayoristas*. DANE: <https://apps.dane.gov.co/pentaho/api/repos/%3Apublic%3ASIPSA%3ASIPSAV17.wcdf/generatedContent>
- Soler & Palau. (2023). *Catalogo electronico*. Soler & Palau Easy vent: <https://easyvent.solerpalau.com/selector>
- Soler Palau. (12 de 12 de 2022). Manual Practico de Ventilacion. En S. Palau, *Manual Practico*

de Ventilacion (págs. 56, 57; 83,84). Barcelona: SALVADOR ESCODA. Soler Palau:
<https://mantenimientoplanificado.com/salvadorescoda.net/Manual-Ventilacion.pdf>

SOMEX. (2023). *TIERRAGRO SAL SOMEX. TIERRAGRO:*
<https://www.tierragro.com/collections/somex/products/sal-somex-ceba-10-50-5-5-40-kl-somex-bovinos>

Team Pashudhan Praharee. (2022). CHALLENGES AND STRATEGIES FOR THE SUSTAINABLE DAIRY FARMING IN INDIA. *pashudhanpraharee Journal*, 5.
<https://www.pashudhanpraharee.com/challenges-and-strategies-for-the-sustainable-dairy-farming-in-india-2/>

Westreicher, G. (04 de abril de 2020). *Ganaderia intensiva*. econopedia:
<https://economipedia.com/definiciones/ganaderia-intensiva.html>