

OPTIMIZACIÓN DE LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE
HIDROPÓNICO CON CONTROL DE TEMPERATURA EN EL MUNICIPIO DE
MONQUIRA

DANIELA MORENO ROJAS
DANIEL GILBERTO RODRIGUEZ SALAMANCA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
BOGOTÁ
2025

OPTIMIZACIÓN DE LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE
HIDROPÓNICO CON CONTROL DE TEMPERATURA EN EL MUNICIPIO DE
MONQUIRA

DANIELA MORENO ROJAS
DANIEL GILBERTO RODRIGUEZ SALAMANCA

DOCENTE:
ING. JOHN HENRY BAUTISTA SEGURA
ING. DANIEL ANDRES BAYONA BUITRAGO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
BOGOTÁ
2025

Contenido

	Pag.
LISTA DE TABLAS	5
1. RESUMEN	7
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
2.2. PREGUNTA PROBLEMA	12
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	18
4.1. OBJETIVO GENERAL	18
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
5. MARCO REFERENCIAL	19
5.1. ESTADO DEL ARTE	19
5.2. MARCO HISTÓRICO	23
5.3. MARCO TEÓRICO	26
5.4. MARCO CONCEPTUAL	32
5.4.1. Forraje verde hidropónico:	32
5.4.2. Hidroponía:	33
5.4.3. Sistema de control:	34
5.4.3. Sensor de temperatura:	35
5.4.3. Lazo abierto y lazo cerrado:	36
5.5. MARCO LEGAL	37
5.5.1. Normativas Agrícolas:	37
5.5.2. Regulaciones Ambientales:	37
5.5.3. Seguridad Alimentaria:	38
5.5.4. Normativas Específicas para la Producción Agrícola:	38
6. DISEÑO METODOLÓGICO	40
6.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	40
6.2. DISEÑO METODOLÓGICO	41
6.3. HIPÓTESIS	44
6.4. PLOBACIÓN Y MUESTRA	45
7. RECURSOS	46

8. RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
8.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FVH	47
8.2. DISEÑO DE PROTOTIPO DE INVERNADERO PARA ANÁLISIS DE TEMPERATURA	48
8.2.1. Diseño fuente de alimentación:	50
8.2.2. Diseño controlador:	52
8.3. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE TEMPERATURA	56
8.4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CONTROL DE TEMPERATURA EN LA PRODUCCIÓN DE FVH	59
8.5. ANÁLISIS DE COSTOS Y BENEFICIOS	61
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.....	19
Tabla 2.....	43
Tabla 3.....	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.....	12
Ilustración 2.....	19
Ilustración 3.....	20
Ilustración 4.....	21
Ilustración 5.....	22
Ilustración 6.....	23
Ilustración 7.....	26
Ilustración 8.....	27
Ilustración 9.....	28
Ilustración 10.....	29
Ilustración 11.....	30
Ilustración 12.....	32
Ilustración 13.....	33
Ilustración 14.....	34
Ilustración 15.....	35
Ilustración 16.....	36
Ilustración 17.....	37
Ilustración 18.....	48
Ilustración 19.....	49
Ilustración 20.....	50
Ilustración 21.....	52
Ilustración 22.....	54
Ilustración 23.....	55
Ilustración 24.....	56
Ilustración 25.....	57
Ilustración 26.....	57
Ilustración 27.....	58
Ilustración 28.....	59
Ilustración 29.....	59
Ilustración 30.....	60
Ilustración 31.....	62

1. RESUMEN

La presente investigación aborda la producción de forraje verde hidropónico en el municipio de Moniquirá, en donde las condiciones climáticas son variables y la falta de control de estas presentan grandes desafíos para obtener un cultivo con eficiencia. El estudio tiene enfoque en la implementación de tecnologías en la industria agraria, que permitan el control de variables como la temperatura, de esta forma maximizar la producción en un entorno el cual se ve enfrentado a limitaciones espaciales y climáticas.

La falta de un manejo óptimo de la temperatura ha sido identificada como un obstáculo para la productividad de forraje verde hidropónico en las áreas rurales. Según Sánchez et al. (2019) y González et al. (2015) la alimentación animal basada en el forraje tradicional puede llegar a afectar de forma negativa la salud del ganado y la calidad del cultivo, además de estar expuestos a riesgos de contaminación. En comparación el forraje verde hidropónico brinda una alternativa más segura, ya que esta al producirse en ambientes controlados, minimiza la exposición a contaminantes, lo que favorece a la mejor calidad del alimento animal y se vuelve una solución viable.

Este estudio presenta un modelo de diseño de línea de producción que añade tecnologías de monitoreo y control de temperatura. El sistema de producción está diseñado siguiendo los principios de Lean Manufacturing y Six Sigma, que mejoran los procesos, minimizan el desperdicio y garantizan una calidad de forraje estandarizada. Mantener el control de temperatura es crítico para un desarrollo uniforme de los cultivos, y se propone utilizar sensores de temperatura que ajusten automáticamente las condiciones ambientales dentro del invernadero.

Para evaluar la viabilidad económica del sistema propuesto se hace un análisis de costos de implantación como parte fundamental del estudio. Se evidencia que se obtienen reducción de tiempos de inactividad y maximizando la eficiencia.

Por ende, para el desarrollo del proyecto se decide utilizar una metodología de enfoque cuantitativo con diseño experimental. Se realiza la construcción de un invernadero para pruebas de germinación y medir el impacto que tiene el control de temperatura en el crecimiento del forraje; los datos que se recolectan en las pruebas se analizarán para evaluar la efectividad del sistema de control implementado.

Los resultados esperados incluyen un aumento en la producción de forraje verde hidropónico debido al mantenimiento de un rango de temperatura óptimo. Sin embargo, se reconoce que otros factores, como la calidad de las semillas

utilizadas y el agua, entre otras variables que influyen en la producción de forraje verde hidropónico, también son de suma importancia para el éxito del cultivo.

Las conclusiones del estudio sugieren que, aunque gestionar la temperatura es un tema importante, un factor igualmente importante es tener en cuenta todas las variables del proceso de producción. Se sugiere que se implementen soluciones de sistemas de control integrado para garantizar el control de recursos, y se hace hincapié en que, para aumentar la producción de forraje verde hidropónico, aún se requiere investigación en áreas como Moniquirá.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El cambio climático es un problema global que genera serias complicaciones por las variaciones de los patrones climáticos, de manera que, afecta la producción agrícola de diversas regiones. En el municipio de Moniquirá, uno de los principales cambios es el crecimiento del periodo de sequía, que a su vez dificulta el suministro de agua para la agricultura (IPCC 2019). Debido a estas condiciones adversas la productividad de los cultivos se ve perjudicada, lo cual afecta la calidad del forraje para la ganadería local. Se presenta un reto crítico para los agricultores y ganaderos de la región por las lluvias irregulares, lo cual disminuye progresivamente los recursos hídricos, de los cuales depende el forraje para alimentar al ganado de manera estable y eficiente (FAO, 2020).

De igual manera la prolongación de las sequías debido al cambio climático afecta de forma significativa la calidad y disponibilidad de las pasturas naturales de la región de Moniquirá. De acuerdo con (Smith et al., 2021) las condiciones desfavorables generan un daño en el crecimiento de las pasturas, lo que provoca que no alcancen el desarrollo propicio de los nutrientes que requiere el ganado. Debido a la escasez de agua y las temperaturas altas, la cantidad de forraje se reduce, al igual que su valor nutricional, lo que lleva a los ganaderos a depender de fuentes alternativas de alimentación, que suelen llegar a ser costosas y de menor calidad (González et al., 2020). Según (Pérez et al., 2019) esta situación pone en riesgo no solo la salud del ganado, sino que también reduce su productividad en términos de producción de leche y carne.

El cultivo de forraje verde hidropónico (FVH) aparece como una solución prometedora ante los desafíos climáticos presentes, a comparación de los métodos tradicionales, el sistema de un cultivo de FVH permite que la producción del forraje sea de alta calidad, y los recursos usados como el agua sean mínimos, además de que se tiene un ambiente controlado, de esta forma no se depende de las condiciones climáticas externas (Rojas et al., 2018). Los invernaderos permiten mantener microclimas a través de entornos controlados, lo que favorece a al crecimiento óptimo del forraje y disminuye los efectos que pueden causar los efectos del cambio climático (Martínez et al., 2021). De acuerdo con (FAO, 2020) esto no solo permite contribuir a la sostenibilidad agrícola y la resiliencia en sistemas productivos, sino que también genera un suministro continuo de alimento para el ganado, sin importar las variaciones climáticas.

Sin embargo, implementar esta técnica, conlleva varios desafíos, empezando por los relacionados con el control de variables tales como la temperatura, humedad y la calidad del aire que se encuentran dentro del cultivo. (Hernández et al., 2019) dice que la falta de controles adecuados en estos factores puede llegar a limitar la eficiencia y viabilidad en la producción de FVH, lo cual afecta la calidad del forraje y la sostenibilidad del cultivo.

Uno de los principales problemas que enfrenta la producción de FVH en el municipio de Moniquirá es la constante variación de temperatura, lo que hace complicando mantener una temperatura optima dentro de los invernaderos hidropónicos. Las continuas fluctuaciones extremas de temperaturas, debido a las condiciones climáticas locales, generar condiciones negativas para el crecimiento del forraje. Según estudios hechos por Ramos et al. (2020), las variaciones constantes de temperaturas pueden llegar a alterar no solo el ciclo del crecimiento de las plantas sino también reducir la tasa de fotosíntesis, limitando así la absorción de nutrientes, en consecuencia, a ello, se ve comprometida la productividad, lo cual impacta de manera negativa, la calidad y cantidad disponible de forraje para el consumo animal.

Junto con la regulación de la temperatura, las variables ambientales cruciales como la humedad relativa, la pureza del aire y el acceso a la luz son fundamentales para el florecimiento de las plantas cultivadas en agricultura. López et al. (2021) enfatizar la necesidad de mantener una atmósfera regulada en cada caso para garantizar la maduración premium de la FVH. El manejo del cultivo sin control de estos elementos puede elevar la enfermedad y la prevalencia de infestación, afectando negativamente la salud vegetal y disminuyendo el rendimiento sistemático. En Moniquirá, donde solo existen escasas disposiciones tecnológicas y monetarias para ejecutar sofisticados mecanismos de gobierno eco ambientales, esta circunstancia empeora, exigiendo la creación de remedios accesibles y eficientes.

Un elemento fundamental que da forma a la productividad del agua y sistemas hidroeléctricos es el manejo del agua y la energía. La agricultura hidropónica genera una reducción del uso del agua, sin embargo, requiere un mayor control de precisión en el riego y en la administración de nutrientes (Pérez et al., 2020). Para asegurarse de que las plantas reciban los nutrientes adecuados en el debido momento y evitar desperdicios, se debe tener un manejo optimo de los recursos, sin embargo, en zonas rurales como Moniquirá, implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y regulación en este proceso es limitada, ya que no se cuenta con la infraestructura y conocimiento técnico, lo que hace que los costos operativos aumenten y la sostenibilidad a largo plazo se reduzca.

En el contexto del cambio climático en Moniquirá se tiene como una necesidad el optimizar el cultivo de FVH. Según Díaz et al. (2020), los patrones de clima fluctuantes y el incremento de la temperatura global afectan de forma grave la

agricultura tradicional, lo que conlleva a que prácticas como el FVH se vuelvan más relevantes al momento de asegurar una disponibilidad de alimento para el ganado en momentos de crisis climáticas, cuando los veranos son prolongados y las sequías son recurrentes en Moniquirá la disponibilidad de pasturas disminuye lo que afecta negativamente a la ganadería local. Sin embargo, Sánchez et al. (2018), también señala que para adoptar esta técnica es necesario un control ambiental riguroso y tecnologías avanzadas, lo cual suele ser difícil de implementar en zonas rurales.

De acuerdo con esto, es esencial que en Moniquirá se tenga una mejora en la capacitación y el acceso de tecnologías modernas, ya que Gómez et al. (2019) afirman que uno de los principales obstáculos para la adaptación generalizada del FVH en zonas rurales es la falta de formación técnica en estas tecnologías. Los cultivos hidropónicos requieren de un manejo cuidadoso debido al manejo de variables como el pH del agua, la conductividad eléctrica y la dosificación de nutrientes, por ende, para su implementación se debe tener un conocimiento básico. Asimismo, se requiere de un constante monitoreo y ajuste periódico de los invernaderos para mantener las condiciones óptimas para el crecimiento del forraje, lo cual simboliza un desafío logístico para los pequeños agricultores, por la adquisición y manejo de estos equipos automatizados.

Un punto más para tener en cuenta es la escalabilidad del FVH en Moniquirá, ya que, a pesar de tener potencial de ser una solución viable para alimentar al ganado en pequeña escala, implementarlo a un nivel mayor presentaría desafíos logísticos y financieros para el pequeño ganadero. Estudios como el de Martínez et al. (2017) sugieren que la producción de FVH genera una reducción en uso tanto de agua como de espacio lo que lo convierte en una solución rentable a largo plazo, sin embargo, los costos de intulaciones de estos cultivos asociados al control ambiental pueden ser poco accesibles para los pequeños productores. Moniquirá es un municipio donde la mayoría de los productores depende de cultivos tradicionales y se enfrentan a restricciones financieras para la inversión de tecnologías como el FVH lo que hace necesario un apoyo gubernamental y privado para que estas tecnologías sean viables.

A pesar de todos estos desafíos que puede llegar a enfrentar la producción de FVH en Moniquirá, este proporciona una fuente confiable y sostenible de alimentos para el ganado durante el año sin temor a las sequías o cambios bruscos de clima, lo que hace que sea una alternativa potencial para transformar la industria ganadera local. Sin embargo, parte de esta solución también implica que se aborden temas relacionados a los cambios climáticos y el control ambiental, según (Hernández et al., 2019), para garantizar que se tenga una producción eficiente y sostenible del cultivo de FVH se requiere implementar un sistema de control de temperatura automatizado, y monitorizando otras variables que puede llegar a ser críticas como

la humedad y la calidad del aire. Igualmente se debe tener en cuenta como una prioridad para los agricultores locales la capacitación del personal y el acceso a esas tecnologías modernas, para que se pueda mantener estos sistemas.

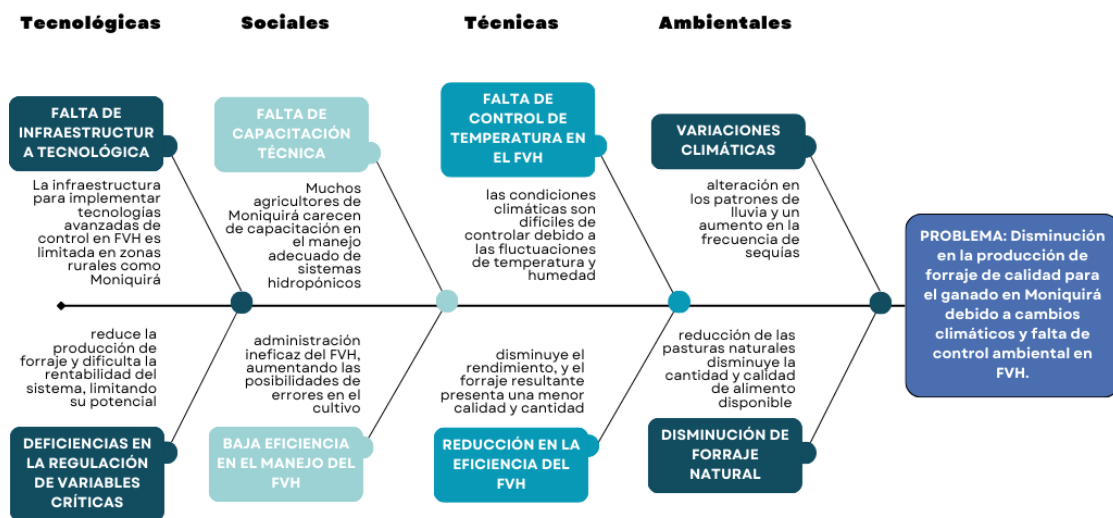
Se debe reconocer que la producción de FVH en Moniquirá no solamente se brinda como una solución técnica al agro, sino que también es una solución viable a desafíos más grandes a los que se enfrenta la agricultura en un entorno en donde se considera el cambio climático y sus constantes fluctuaciones. Según Díaz et al. (2020), es fundamental garantizar por la seguridad alimentaria que se tenga en cuenta la adaptación a las condiciones climáticas, por ende, el FVH se convierte en una oportunidad para mejorar la resiliencia en la agricultura local de Moniquirá.

2.2. PREGUNTA PROBLEMA

¿De qué manera influye la implementación de un sistema de control de temperatura apoyado por los principios de lean manufacturing y six sigma para la producción de forraje verde hidropónico en invernadero como suplemento alimenticio del ganado en la región de Moniquirá?

Ilustración 1.

Espina de pescado planteamiento del problema



Nota: Fuente propia, 2024

3. JUSTIFICACIÓN

La implementación de sistema de producción de forraje verde hidropónico (FVH) en el municipio de Moniquirá, Boyacá busca abordar de manera alternativa los desafíos actuales que plantea el cambio climático en la producción ganadera local. La agricultura convencional donde se ve afectada por los cambios en los periodos de lluvia y el incremento de las temporadas de sequías, los sistemas de FVH ofrecen una solución viable, sostenible y adaptada a las condiciones climáticas locales (Ramírez & López, 2022). Moniquirá, como otros municipios en zonas semiáridas, enfrenta una creciente dificultad para sostener una producción agrícola consistente debido a las condiciones climáticas adversas que limitan tanto la cantidad como la calidad de los cultivos destinados a la alimentación animal (Pérez et al. 2021). Esta dependencia de factores climáticos impredecibles en la producción de forraje para el ganado de manera convencional no solo afecta la economía local, sino también la seguridad alimentaria y la calidad de vida de los pequeños y medianos agricultores (FAO, 2019).

Dicho lo anterior la eficiencia del sistema de FVH en términos de consumo de agua es considerablemente alta, lo cual genera ventajas para la adaptación de la producción de forraje en regiones afectadas por la escasez hídrica. Estudios han señalado que los sistemas hidropónicos de producción de forraje pueden emplear hasta un 90% menos de agua en comparación con los métodos de cultivo tradicionales, lo cual permite mantener una producción estable en entornos con acceso limitado a este recurso (Martínez et al., 2020). Al emplear sistemas de riego controlados y de ciclo cerrado, el FVH reduce las pérdidas de agua por evaporación y lixiviación, lo que influye de manera positiva en Moniquirá, donde la disponibilidad de agua superficial y subterránea ha disminuido debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos y a los efectos de la sequía prolongada (García & Salazar, 2018). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el desarrollo de tecnologías de cultivo con bajo consumo de agua es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria en comunidades rurales que dependen de sistemas agrícolas tradicionales (FAO, 2019).

Ya que el FVH, además de aumentar el ahorro en el uso del agua de manera eficiente, también ofrece un forraje de alta calidad nutricional, esto permite mantener la productividad ganadera en regiones con baja producción de pasturas naturales. Los autores Ramírez y Hernández (2021) indican que el FVH ofrece grandes cantidades de proteínas, vitaminas y minerales que son fundamentales para la salud del ganado, lo que produce un impacto positivo en la producción de carne y leche. Ellos señalan que estos beneficios son habituales en la literatura de nutrición animal y arguyen que el FVH es un alimento más digestible y nutritivo que los cultivos de forrajes convencionales, cuyas calidades están comprometidas por las variaciones climáticas y la baja fertilidad del suelo (López & Ramírez, 2022). Por otro lado, el

FVH como fuente alimenticia de primer nivel durante todo el año, constituye una gran utilidad competitiva en el municipio de Moniquirá, donde la variabilidad climática ha aumentado el déficit de los pastos naturales para atender las necesidades alimenticias del ganado, comprometiendo su productividad y la sustentabilidad de la ganadería en la región (Pérez et al., 2021).

Sumado a esto, otro aspecto relevante del FVH es su reducción de costos operativos en la producción ganadera a largo plazo. Si bien la inversión inicial para instalar un sistema hidropónico puede ser elevada, estudios han demostrado que los ahorros en insumos como agua, fertilizantes y forraje externo permiten recuperar la inversión rápidamente y asegurar la sostenibilidad financiera del sistema (Hernández & Rojas, 2020). García et al. (2021) señalan que el FVH puede reducir hasta un 40% los costos de alimentación, generando un impacto económico positivo en los ganaderos locales. Esto hace que el FVH sea una muy buena alternativa para el municipio de Moniquirá, donde el acceso a fuentes externas de alimento es limitado y costoso debido a las fluctuaciones en el mercado y a los costos derivados del transporte. La implementación del FVH permite a los productores locales desarrollar una mayor autonomía en sus procesos productivos, reduciendo su dependencia de factores externos y, en consecuencia, aumentando la adaptabilidad de sus sistemas productivos frente a los efectos del cambio climático y las fluctuaciones del mercado (García et al., 2021).

De este modo, la sostenibilidad del FVH también se extiende al contexto ambiental. La producción en entornos controlados permite reducir el uso de pesticidas y fertilizantes, lo cual disminuye la contaminación de suelos y cuerpos de agua cercanos, problema que normalmente se deriva de la agricultura tradicional intensiva (Moreno & Castillo, 2021), esto a su vez permite que la huella de carbono de los sistemas de FVH sea menor en comparación con los métodos de cultivo convencionales, lo que contribuye a una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la actividad agrícola (Silva et al., 2019). Asimismo, como este cultivo requiere menos espacio, el FVH favorece a la liberación de varias tierras que pueden enfocarse en la regeneración de áreas naturales o en implementar prácticas agroforestales, de esta forma contribuir a la recuperación de ecosistemas degradados (FAO, 2019). Para el municipio de Moniquirá esto resulta ser valioso, ya que es preocupante que la expansión de áreas agrícolas es determinante en zonas forestales, lo que puede llegar a afectar la sostenibilidad ambiental de la región (Rodríguez & González, 2019).

Por otro lado, desde un punto de vista social, el FVH al ser una fuente constante y accesible de alimento para ganado, tienen implicaciones positivas significativas, ya que estas tecnologías son favorables para las familias productoras, quienes viven de la producción ganadera por ser su actividad económica principal, ya que esta les genera seguridad alimentaria local y protege sus medios de sustento (Pérez et al., 2021). Según la FAO tecnologías como el FVH son destacadas ya que ayudan a

mantener los sistemas alimentarios y especialmente en entornos donde existe vulnerabilidades por el cambio climático, ya que los sistemas de ambientes controlados mantienen una estabilidad en los suministros de alimento para los animales y reducen la explotación de las comunidades, como a sequías o inundaciones, lo que podría llegar a afectar la disponibilidad del forraje (FAO, 2019). Tecnologías como estas proporcionan respuestas inmediatas a grandes desafíos actuales, además de ello ofrece una base para el desarrollo de prácticas sostenibles y adaptabilidad a largo plazo. Según (Moreno & Castillo, 2021) el FVH hace posible la adaptabilidad de las comunidades rurales a condiciones climáticas extremas sin verse obligadas a dejar sus tierras, además de fortalecer las comunidades, preservando tradiciones y prácticas culturales sujetas a la activada ganadera, lo cual redice la migración hacia zonas rurales lo que a menudo incrementa la presión sobre los servicios públicos y recursos de las ciudades. En este sentido, el FVH contribuye a mejorar la calidad de vida en las zonas rurales al ofrecer un medio de subsistencia más seguro y estable, generando además oportunidades de empleo local y promoviendo un entorno que incentiva a los jóvenes a permanecer y desarrollarse en sus comunidades.

Uno de los principales desafíos en la implementación del FVH es la necesidad de conocimientos técnicos especializados para administrar los sistemas de hidroponía. La administración de variables como el pH del agua, la administración de nutrientes, la regulación de la temperatura y la humedad es crítica para el rendimiento y la rentabilidad del sistema, por lo tanto, es importante capacitar a los agricultores sobre cómo lograr niveles óptimos. Por lo tanto, la capacitación continua y la asistencia técnica son críticas. Investigaciones previas indican que la educación tecnológica y las transferencias de habilidades son cruciales para integrarse y prevalecer en los avances agrícolas rurales, lo que permite a los recortes para refinar y ejecutar técnicas de forma independiente (Moreno y Castillo, 2021). La asociación entre los organismos gubernamentales, las ONG y las empresas es crucial para brindar ayuda técnica y monetaria necesaria, lo que permite a los agricultores superar los desafíos de inicio y manejar efectivamente sus sistemas FVH, según (Silva et al., 2019).

La implementación de FVH podría traer beneficios al nivel de la diversidad biológica, ya que este sistema ayuda a controlar la vuelta a la agricultura intensiva convencional, la cual causa la destrucción de hábitats de muchas especies. FVH ayuda a conservar la zona natural de los ecosistemas y también ayuda a su recuperación, lo que a su vez permite la preservación de la biodiversidad, ya que reduce la necesidad de tierras cultivables. Asimismo, la polinización y el control natural de plagas se ven beneficiados con la presencia de la diversidad en la agricultura, a su vez mejorando la producción y el entorno natural (García & Castillo, 2022). En otras regiones se ha comprobado previamente que la recuperación de tierras por medio de sistemas hidropónicos ayuda a mantener los corredores

biológicos y por ende se preservan y desplazan las especies autóctonas (Martínez et al., 2020).

Además de los beneficios a la biodiversidad, el FVH contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al minimizar la necesidad de maquinaria agrícola intensiva y al reducir el transporte de forraje desde otras regiones. Según Ramírez y López (2021), los sistemas tradicionales de producción de forraje requieren el uso de equipos de labranza y cosecha que emiten grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases contaminantes. En contraste, el FVH se realiza en entornos controlados y no necesita maquinaria pesada, lo cual reduce significativamente las emisiones generadas en el proceso de producción. Asimismo, al reducir la dependencia de fuentes externas de alimento, los ganaderos locales disminuyen el uso de transporte, lo cual se traduce en menores emisiones de CO₂, contribuyendo a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático (FAO, 2019).

El FVH también favorece la economía circular en las comunidades rurales al reutilizar recursos y reducir el desperdicio. Los sistemas de cultivo hidropónico permiten la reutilización del agua y de algunos nutrientes, lo cual es especialmente importante en regiones con escasez de recursos. Además, el forraje producido puede ser integrado directamente en la cadena productiva ganadera, creando un sistema autosuficiente donde los desechos orgánicos del ganado pueden ser transformados en biogás o fertilizantes, cerrando el ciclo productivo y promoviendo una economía circular (Hernández et al., 2020). Este tipo de prácticas permite a los ganaderos reducir costos asociados a la adquisición de insumos externos y contribuye a la sostenibilidad del modelo de producción, al tiempo que mejora la autonomía de las comunidades locales frente a los factores de mercado (Gómez & Rojas, 2021).

La implementación de FVH en Moniquirá también plantea un avance significativo hacia la modernización de la agricultura en la región. La adopción de sistemas de producción controlados mediante tecnología hidropónica permite que los agricultores se adapten a los nuevos desafíos que el cambio climático impone. Estudios recientes destacan que la digitalización y automatización en la agricultura permiten una mayor eficiencia y precisión en el control de variables críticas como la humedad, la temperatura y el nivel de nutrientes, lo que mejora el rendimiento de los cultivos y reduce las pérdidas (Silva et al., 2021). Esto permite que los productores locales de Moniquirá no solo mejoren sus prácticas productivas, sino también que adquieran nuevas habilidades técnicas que les permitan operar estos sistemas de manera autónoma y eficiente (FAO, 2019).

Otra ventaja del FVH es su fuerza para crear trabajo en la región, ayudando directamente a la economía local y al bienestar de las comunidades rurales. La puesta en marcha y manejo de estos sistemas necesita personal capacitado para

el seguimiento de cultivos, el cuidado de equipos tecnológicos, y la gestión del sistema hidropónico; aumentando la necesidad por trabajadores con habilidades especiales en tecnología agrícola (Pérez et al., 2022). Además, el FVH abre puertas para pequeños negocios locales que dan insumos, equipos o servicios de mantenimiento; uniendo una cadena de valor alrededor de la producción hidropónica que beneficia a varios actores de la economía local. La creación de trabajos especializados ayuda reducir el éxodo rural motivando los jóvenes a quedarse en sus comunidades al ofrecerles un medio viable para vivir y oportunidades profesionales.

Desde un punto de vista educativo, una oportunidad interesante relacionada con FVH se caracteriza por su implementación como una manera de promover la adquisición y transferencia de conocimientos sobre prácticas agrícolas sostenibles. La formación en FVH y en la gestión de tecnologías de agricultura controlada podría incluirse en un programa de formación técnica o en asociaciones locales, de manera que los agricultores aprendan y compartan buenas prácticas.

Así, FVH no solo desempeña un papel integrador en la producción ganadera, sino que también actúa como una herramienta de desarrollo humano a través de la formación de la comunidad en conocimientos relevantes y habilidades adecuadas para los próximos desafíos agrícolas (García et al., 2022). Según la FAO (2019), la educación continua y la formación en prácticas agrícolas innovadoras son cruciales para sistemas de producción agrícola sostenibles y resilientes.

Finalmente, la incorporación de FVH en Moniquirá genera cumplimiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente aquellos asociados con la eliminación de la pobreza, la seguridad del suministro de alimentos y la acción climática. Los agricultores ganaderos pueden aumentar su productividad y, en consecuencia, estabilizar sus ingresos a través de la disponibilidad constante de forraje de buena calidad, lo que lleva a una disminución de la pobreza rural (López & Ramírez, 2022).

Además, FVH ha sido un defensor de la producción agrícola sostenible, no solo para proteger el medio ambiente, sino también para ayudar a las comunidades a transformarse para ser menos dependientes de las importaciones. Según la FAO (2019), las prácticas agrícolas que integran innovación y sostenibilidad son esenciales para construir sistemas alimentarios resilientes y para promover el desarrollo económico en las zonas rurales.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de línea de producción automatizado para el cultivo de forraje verde hidropónico mediante la estandarización de tiempos de producción y el control de temperatura en el prototipo.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el proceso de producción de forraje verde hidropónico identificando las posibles áreas de mejora mediante un estudio detallado de tiempos y su relación con la temperatura
- Diseñar un prototipo de invernadero para el cultivo de forraje verde hidropónico que facilite el análisis de temperatura mediante la automatización del sistema.
- Implementar un sistema de control de temperatura en el cultivo de forraje verde hidropónico que mejore la producción mediante el monitoreo y ajuste automatizado de la temperatura.
- Evaluar los resultados del proceso de control de temperatura en la producción de forraje verde hidropónico (FVH), mediante la comparación de la producción antes y después de su implementación.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. ESTADO DEL ARTE

Como concluyeron Gómez et al. (2018) en un informe, en comparación con los métodos tradicionales de cultivo al aire libre, el cultivo de forraje verde hidropónico ha reducido el uso de agua necesario hasta en un 90 por ciento. Esto se debe a que las plantas desarrolladas en un sistema hidropónico pueden absorber y retener el agua que normalmente se escurriría fuera de la zona de raíces, lo que permite un uso más eficiente de los recursos menos disponibles.

Como se menciona en un artículo científico de García et al. (2019), por otro lado, el FVH se cultiva en ambientes controlados, lo que reduce la incidencia de patógenos y contaminantes en el forraje producido. Esto ayuda a garantizar la seguridad alimentaria y disminuye la dependencia de químicos o pesticidas para el control de plagas y enfermedades.

Fernández et al. publicaron un estudio indicando que (2019) han demostrado que el FVH puede producir un mayor rendimiento de biomasa que un sistema agrícola normal. Técnicas hidropónicas optimizadas. Los autores informan que el uso de fertirrigación controlada y configuraciones de sistemas hidropónicos puede optimizar el crecimiento de las plantas y la producción de forraje.

Tabla 1.
Análisis comparativo entre cultivos tradicional e hidropónico

	Sobre suelo	Sin suelo
Nutrición de Planta	Muy Variable Difícil de Controlar	Controlada, estable Fácil de chequear y corregir
Espaciamiento	Limitado a la fertilidad	Densidades mayores, mejor uso del espacio y la luz
Control de Malezas	Presencia de Maleza	Prácticamente inexistentes
Enfermedades y Patógenos del suelo y nemátodos	Enfermedades del Suelo	No existen Patógenos del suelo
Agua	Plantas sufren estrés Ineficiente uso del Agua	No existe estrés hídrico Pérdida casi nula

Nota: Adaptado de "Hidroponía: Sus ventajas y desventajas," Elsemiarido.com, (2024)

Según un estudio de Romero et al. (2020), el forraje verde hidropónico se ha usado de manera exitosa para la alimentación de rumiantes como lo son las ovejas y las vacas lecheras. Al contar con una alta calidad nutricional y una disponibilidad constante de forraje verde hidropónico estos contribuyen a mejorar la producción de leche y carne en estos animales.

Li et al. (2021) evalúa el potencial del FVH para mejorar la calidad de la carne de cerdo. Se encontró que al incluir FVH dentro de la alimentación de los cerdos esto, no solo genero una mejora es su crecimiento, sino que por otro lado también mejoro a la eficiencia de la alimentación, lo que genera un impacto positivo en la calidad de la carne, mejorando la composición de ácidos grasos y la terneseza.

Ilustración 3

Fotografía de luces LED utilizadas en un sistema hidropónico.



Nota: Adaptado de "Sistema hidropónico que utiliza luces LED para el crecimiento de plantas," Freepik. (2024).

Según un estudio de Rui et al. (2021) el FVH en comparación con los sistemas de cultivo tradicionales y convencionales tiene un menor impacto ambiental, debido a que este ayuda a la reducción del uso del agua, además de tener una capacidad de producción en espacios reducidos, lo que disminuyen la huella ambiental, al tiempo

que contribuyen a la mitigación del cambio climático y a la conservación de recursos naturales.

Investigaciones realizadas por Ribeiro et al. (2021) han demostrado que el FVH puede ser utilizado en la alimentación de aves de corral, como pollos y pavos. La inclusión de forraje verde hidropónico en la dieta de las aves ha mostrado efectos positivos en el crecimiento, la salud y la calidad de la carne.

Ilustración 4.

Rumiantes alimentados con forraje verde hidropónico (FVH).



Nota: Adaptado de "Producción de forraje verde hidropónico," Agrotendencia. (2024).

Un estudio de Franco et al. (2021) ha investigado la aplicación del FVH en la alimentación de animales de compañía, como perros y gatos. Los autores encontraron que el forraje verde hidropónico puede ser utilizado como suplemento alimenticio en las dietas de mascotas, aportando nutrientes esenciales y promoviendo su salud y bienestar.

Laila Bernal, 2021) afirma que entre los beneficios que ofrece el FVH está la adaptación frente al cambio climático debido a que estos cultivos se producen en invernaderos donde se controlan las condiciones ambientales. La vigilancia constante en este tipo de plantación permite evitar en gran medida enfermedades y no requieren el uso de agroquímicos para eliminar plagas, puesto que no se exponen al aire libre. A su vez permite la conservación del suelo, ya que no se utiliza en su producción y se reduce la cantidad de agua que se emplea.

Ilustración 5.

Sistema de invernaderos hidropónico moderno.



Nota: Adaptado de "Sistemas de Invernadero Hidropónico," AYS Proje. (2024).

A partir de la investigación de Hafner et al. (2022), el FVH puede llegar a adaptarse para funcionar en muchos tipos de terrenos y climas, permitiendo que sea una opción para tener en cuenta en diferentes partes del mundo. Así mismo, tiene la posibilidad de cultivarse durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas externas, brindando una mayor flexibilidad y disponibilidad de alimento para el ganado.

En un análisis realizado por Wang et al. (2022), se detalló la viabilidad económica del cultivo a gran escala de FVH. Los autores llegaron a la conclusión que, a pesar de los altos costos iniciales de inversión para la producción de FVH, este puede ser

rentable a largo plazo debido a su alta eficiencia en el uso del agua y nutrientes, adicional a la posibilidad de obtener múltiples cosechas en el año.

Teniendo en cuenta la investigación de Martínez-García et al. (2022), el FVH se ha implementado en la producción de alimentos orgánicos para complementar la dieta de los animales, debido a la ausencia del control de plagas con pesticidas y la posibilidad de controlar los nutrientes y la calidad del forraje verde hidropónico, esto lo convierten en una muy buena opción para la producción de alimentos orgánicos certificados.

*Ilustración 6.
Sello de certificación orgánica.*



Nota: Adaptado de "¿Qué es un certificado orgánico?," Blog de Fagro. (2024).

5.2. MARCO HISTÓRICO

Como se menciona en las investigaciones realizadas por Rodríguez et al. (2013), inicialmente en la década de 1930 se realizaron las primeras pruebas para cultivar el forraje verde hidropónico en estados unidos. Para esta época los científicos exploraron el potencial de la hidroponía como alternativa para la producción de alimentos para el ganado en áreas con suelos poco productivos y con recursos

hídricos escasos. Sin embargo, estas primeras investigaciones no lograron un desarrollo significativo por las limitaciones tecnológicas y la falta de conocimiento de la época.

Un avance importante en el desarrollo del forraje verde hidropónico se produjo en la década de 1970, como menciona Smith y Struik (2014). En aquella época se pudo crear un ambiente óptimo para el crecimiento de FVH en condiciones controladas, con los avances en la tecnología de iluminación artificial y los sistemas de control ambiental, permitiendo un mayor control sobre las variables que afectan el crecimiento de las plantas, como lo es la luz, la temperatura y la humedad, lo que resultó en un aumento significativo en la eficiencia de producción y calidad nutricional del forraje.

Adicional a esto, analizando el estudio de Santos et al. (2015), en las últimas décadas ha habido un creciente interés en el FVH como alternativa sostenible y eficiente para la producción de biomasa como fuente de alimentación para especies menores. Los avances tecnológicos en la hidroponía y a su vez en la comprensión de los requerimientos nutricionales dentro de las dietas alimenticias de los animales han contribuido al desarrollo de sistemas de cultivo más eficientes y rentables.

En consecuencia, un aspecto clave del avance a lo largo del tiempo de los sistemas de FVH ha sido la mejora de las redes de iluminación artificial. Como muestran las investigaciones realizadas por Li et al. (2017), la introducción de luces LED de alta eficiencia energética han permitido mejorar el control del espectro de luz, permitiendo así las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas del forraje. Como resultado se obtuvo un aumento significativo en la producción de biomasa y en la calidad nutricional del forraje.

Seguido a esto, en la última década la producción de forraje verde hidropónico ha obtenido gran relevancia rápidamente debido a su potencial para hacer frente a los desafíos de seguridad alimentaria y la creciente demanda de alimento de calidad para el ganado, como se evidencia en el informe de García et al. (2018), el uso de forraje verde hidropónico se ha extendido a diferentes regiones del mundo, incluyendo países como Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Brasil, entre otros.

Debido al gran impacto que genera el FVH día a día se evidencian más estudios y avances apoyados en la tecnología para mejorar y optimizar la producción, los avances en la automatización y los sistemas de control ambiental han desempeñado

un papel importante. De acuerdo con el informe de Wang et al. (2018), la integración de tecnologías como sensores de humedad, controladores de temperatura y sistemas de riego automatizados han permitido un monitoreo y ajuste precisos de las condiciones de crecimiento. Esto ha optimizado la eficiencia de uso de recursos como agua y nutrientes, al tiempo que ha reducido los costos de producción.

En complemento, para lograr un sistema de producción idóneo, se debe realizar un proceso de selección de variedades de plantas de forraje más adecuadas para el cultivo hidropónico, esto ha sido un área de investigación en constante avance. El estudio de Liu et al. (2019) demuestra el desarrollo de rasgos específicos en cultivos. Por ejemplo, desarrollar una mayor resistencia a enfermedades, mejorar la capacidad de absorber nutrientes y equilibrar los nutrientes en relación con las necesidades del ganado.

Un estudio de Berhe et al. (2019) mostró que usar FVH como cultivo forrajero tiene mayores beneficios en la eficiencia de conversión de alimento y en la productividad animal. En comparación con los cultivos forrajeros convencionales, se ha demostrado que el FVH es más nutritivo y digestible, lo que permite un mayor aumento de peso en los animales. Además, se ha demostrado que el FVH es particularmente útil para alimentar especies que son sensibles a cambios drásticos en la dieta, como los rumiantes.

Como punto importante a destacar es que el FVH se puede utilizar en una amplia gama de especies ganaderas. Según el estudio de Yang et al. (2019), se ha aplicado con éxito en la alimentación de bovinos, ovinos, caprinos, aves de corral y conejos, entre otros. Además, se ha demostrado que el FVH es adecuado para la alimentación de animales en diferentes etapas de crecimiento y producción, desde terneros en fase de destete hasta animales adultos en producción lechera o engorde.

Laila Bernal, (2021) afirma que entre los beneficios que ofrece el FVH está la adaptación frente al cambio climático debido a que estos cultivos se producen en invernaderos donde se controlan las condiciones ambientales. La vigilancia constante en este tipo de plantación permite evitar en gran medida enfermedades y no requieren el uso de agroquímicos para eliminar plagas, puesto que no se exponen al aire libre, a su vez esto permite la conservación del suelo, como no se utiliza directamente en su producción, se reduce la cantidad de agua que se emplea.

5.3. MARCO TEÓRICO

A lo largo del tiempo la agricultura, ha ido evolucionando, permitiendo que esta actividad fundamental para la alimentación y el desarrollo económico de nuestra sociedad genere diferentes enfoques y técnicas de cultivo. A pesar de esta evolución la agricultura tradicional, aún se mantiene como el método de cultivo predominante, basada en prácticas observacionales y experimentales. Sin embargo, las ventajas de las nuevas tecnologías aplicadas a la producción agrícola presentan ventajas mayores respecto a las técnicas tradicionales.

Partiendo de la idea anterior Smith et al. (2020), plantea los conceptos de agricultura de precisión y el smart farming como metodologías emergentes que aprovechan las nuevas tecnologías para recopilar datos detallados sobre las condiciones del suelo, el clima y los cultivos, de esta manera permitiendo mejorar en gran medida la gestión de los cultivos, la aplicación de insumos y la utilización de recursos, teniendo como resultado una producción más eficiente y sostenible.

Ilustración 7.

Sistema de agricultura de precisión con sensores de suelo y sistemas de gestión digital.



Nota: Wikifarmer. (s.f.), 2024

Partiendo de la idea anterior se presentan los invernaderos como una de las principales tecnologías que permiten optimizar el entorno de cultivo al proporcionar condiciones estables de temperatura, humedad y luz. De acuerdo con Castillo et al. (2019), los invernaderos posibilitan la producción del cultivo fuera de temporada, cuidándolos de las inclemencias del tiempo y las plagas, aumentando así su productividad y la calidad de los productos agrícolas.

Ilustración 8.

Invernadero moderno con cultivos protegidos y estructuras avanzadas.



Nota: Live Plant Biotech. (s.f.), 2023

Teniendo en cuenta el concepto de alimentos orgánicos, como lo establece Martínez et al. (2017), en su estudio, se refiere a productos cultivados sin el uso de pesticidas sintéticos, fertilizantes químicos u organismos modificados genéticamente. Este tipo de agricultura promueve prácticas sostenibles que respetan el medio ambiente y garantizan la salud y el bienestar de los consumidores.

Así mismo el forraje verde hidropónico al ser producido evitando el uso de pesticidas y fertilizantes químicos, puede ser considerado como una dieta orgánica, puesto que los rumiantes, como las vacas y las ovejas, tienen necesidades específicas de nutrientes, el FVH suple lo necesario como fuente alimenticia importante para los rumiantes, ya que proporciona nutrientes esenciales para su crecimiento y

desarrollo. Esta afirmación coincide con los hallazgos de diversos estudios sobre la nutrición animal (Torres et al., 2019).

Ilustración 9.

Rumiantes consumiendo forraje verde hidropónico en un entorno controlado.



Nota: ResearchGate. (s.f.), 2023

El uso de la tecnología en la agricultura, por medio del control de variables representa la oportunidad para la producción y asegurar el mejor desarrollo de las plantas, según López et al. (2021), la temperatura, la humedad y la luz son parámetros clave que deben ser monitoreados y mantenidos constantes para proporcionar el entorno óptimo para las plantas. Los sensores son esenciales en este campo, ya que permiten la recolección de datos en tiempo real, el control automatizado y una menor intervención humana. Estudios recientes muestran como las mejoras en la productividad en los sistemas de cultivo intensivo han sido el resultado de la implementación de sistemas de control basados en sensores (González et al., 2022).

De esta manera, estos sensores son esenciales para la gestión de microclimas en invernaderos, ya que permiten activar automáticamente sistemas de calefacción,

ventilación o refrigeración si es necesario (Pérez et al., 2020). Uno de los factores importantes en dichos dispositivos es la precisión; en este caso, es posible garantizar que los cultivos no sufran variaciones térmicas extremas, lo cual es crítico en regiones con climas impredecibles. Además, la tecnología moderna ha desarrollado sensores inalámbricos que no solo facilitan una instalación más sencilla, sino que también permiten el monitoreo remoto, mejorando así la eficiencia operativa (Rojas et al., 2021).

Los avances tecnológicos respecto a los sensores han hecho posible su integración con otros dispositivos como actuadores y controladores programables, que forman la base de sistemas de automatización robustos y eficientes. Por ejemplo, los sistemas basados en sensores para medir la humedad trabajan en paralelo con sensores de temperatura para asegurar un mejor control del ambiente de crecimiento. Se descubrió que estos sensores trabajando juntos, según Martínez et al. (2017), mitigan los riesgos de cambios extremos en la humedad o temperatura, lo que mejora la calidad y el rendimiento de los cultivos.

Ilustración 10.

Sensores de temperatura y humedad integrados en un sistema agrícola



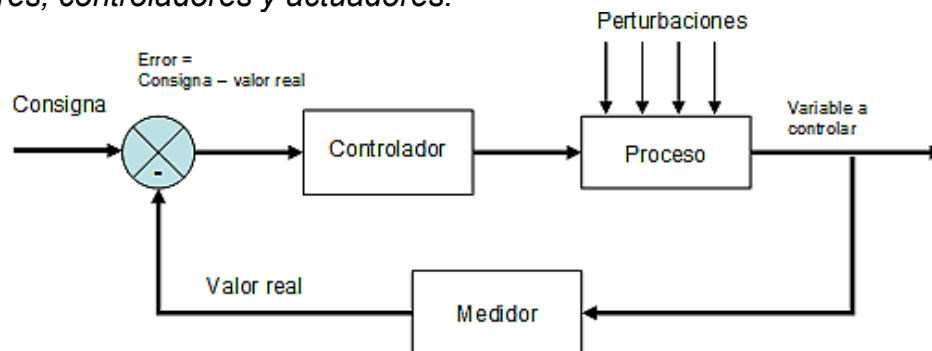
Nota: Agriculus. (s.f.), 2023

En términos de sistemas de control, el circuito de lazo cerrado es una solución ampliamente utilizada en la agricultura moderna. Este sistema utiliza retroalimentación continua para ajustar variables críticas como la temperatura, manteniéndolas dentro de los límites designados. En invernaderos, un sistema de lazo cerrado puede utilizar datos de sensores de temperatura para encender automáticamente ventiladores o calefactores para asegurar condiciones óptimas de crecimiento de las plantas (López et al., 2021). Además, algoritmos avanzados como Proporcional-Integral-Derivativo (PID) mejoran considerablemente la capacidad de respuesta del sistema a los cambios en el entorno, lo cual es esencial en condiciones climáticas impredecibles (Gómez et al., 2020).

Un cambio más notable es la incorporación de plataformas basadas en IoT (Internet de las Cosas). Con esta tecnología, se pueden integrar sensores de temperatura, humedad y luz con redes de comunicación para la recolección de datos, análisis y acciones que se ejecuten de manera instantánea y remota. Hernández et al. (2022) señalan que la aplicación de tecnologías IoT en los sistemas agrícolas ha demostrado mejorar la precisión de la monitorización mientras se reducen los costos operativos y se optimiza el consumo de recursos como agua y energía. Esta tecnología es especialmente útil en regiones rurales, donde el acceso constante al sistema puede ser limitado.

Ilustración 11.

Diagrama de un sistema de control de lazo cerrado en invernaderos, con sensores, controladores y actuadores.



Nota: Infoagro. (s.f.). Control de riego y fertilización, 2022

El Lean Manufacturing es una metodología que busca maximizar la eficiencia en los procesos productivos al eliminar desperdicios y optimizar el uso de recursos. Aplicado a la agricultura, este enfoque puede contribuir a reducir los insumos y mejorar el rendimiento, tal como lo describen Womack y Jones (2003). En un sistema de forraje hidropónico, se puede aplicar Lean al minimizar el desperdicio de

agua y optimizar el uso del espacio y los nutrientes, mejorando así la productividad del cultivo.

Por su lado, el enfoque de Six Sigma se basa en la mejora continua de procesos a través de la reducción de variabilidad y defectos. Durante la producción de forraje verde hidropónico, este método es valioso porque ayuda a controlar temperaturas y niveles de humedad, garantizando que los cultivos crezcan en condiciones óptimas y consistentes (George, 2002). En este caso, six sigma permite que el proceso obtenga mejores controles, estándares y la posibilidad de predicción.

Con relación a las energías renovables y sostenibles, tienen un impacto bastante importante en la sostenibilidad del sistema productivo. La integración de tecnologías renovables como la solar, además de contribuir en la reducción de costos operacionales en el largo plazo, también ayuda a mitigar el daño que el sistema de producción agrícola causa en el medio ambiente. La mejora de la sostenibilidad y la reducción de la huella de carbono en la producción agropecuaria moderna se logra al implementar energías renovables, como se indica en el reporte de la Agencia Internacional de Energía 2021.

El análisis de costos y beneficios es otra herramienta clave en la evaluación de la viabilidad de un proyecto agrícola. Según Boardman et al. (2018), esta metodología permite comparar los costos iniciales de implementación de tecnologías avanzadas, como el control automatizado de temperatura, con los beneficios a largo plazo, como la mejora en la calidad del forraje, la reducción de insumos y el aumento de la productividad. La implementación de tecnologías innovadoras y sostenibles puede representar una inversión significativa, pero los beneficios a nivel de reducción de costos y mejora de la eficiencia suelen superar con creces las inversiones iniciales.

Ilustración 12.

Representación gráfica del análisis de costos y beneficios aplicado a un proyecto agrícola.



Nota: Agraw Data. (s.f.), 2023

5.4. MARCO CONCEPTUAL

5.4.1. Forraje verde hidropónico:

Según el estudio realizado por Boros et al. (2018), el término ‘forraje verde hidropónico’ se refiere al cultivo de cultivos forrajeros hidráulicos. Las plantas no se cultivan en suelo, sino que sus raíces se colocan en una solución acuosa rica en nutrientes que contiene todos los elementos necesarios para que las plantas crezcan. Tal sistema ofrece un mejor control sobre la calidad y disponibilidad de los nutrientes, proporcionando una mayor eficiencia en el uso del agua.

En un artículo escrito por Fernández et al. (2020), el forraje verde hidropónico se define como un sistema de producción de forrajes para animales donde los forrajes vegetales se cultivan en un sistema hidropónico, como el NFT (Técnica de Película Nutriente) o sistemas de torres verticales. Estos métodos permiten el cultivo eficiente y continuo de forrajes y un suministro constante de forraje fresco y nutritivo para el ganado.

Además, un estudio realizado por Pérez et al. (2018) destaca que el forraje verde hidropónico ofrece ventajas en términos de eficiencia en el uso del agua y capacidad de producción durante todo el año. Debido a que las plantas se cultivan en un medio acuoso, se puede reducir significativamente el consumo de agua en comparación con los sistemas de cultivo convencionales. Además, el FVH proporciona un

suministro constante de forraje fresco y nutritivo, lo que contribuye a mejorar la alimentación y el rendimiento del ganado.

Ilustración 13.

Cultivo de forraje verde hidropónico.



Nota: Agroshow. (s. f.). Sistema de forraje hidropónico, 2024

5.4.2. Hidroponía:

Según un estudio realizado por Resh (2018), la hidroponía es un sistema de cultivo que utiliza una solución equilibrada de agua y nutrientes para proporcionar todo lo que las plantas necesitan para su crecimiento y desarrollo. En lugar de extraer nutrientes del suelo, las plantas absorben el agua con los nutrientes, lo que aumenta la eficiencia del crecimiento y lleva a una mayor concentración de nutrientes esenciales.

Un artículo científico publicado por Savvas et al. (2013) define la hidroponía como una forma de agricultura en la que las plantas se cultivan sin suelo, utilizando un medio inerte o una solución de agua rica en nutrientes como medio de crecimiento. Este método permite un control preciso sobre las concentraciones de nutrientes, el pH y otras condiciones ambientales, lo que hace posible mejorar el crecimiento y reducir el consumo de agua y fertilizantes.

Además, un estudio realizado por Badgujar et al. (2021) señala que la hidroponía es un sistema de cultivo que se basa en la ausencia de suelo, utilizando un medio de soporte inerte, como lana de roca o fibra de coco, para sostener las raíces de las plantas. Las raíces están expuestas a una solución acuosa rica en nutrientes, que se suministra de manera regular y controlada. Esto permite un crecimiento rápido

de las plantas, un uso eficiente de los nutrientes y un menor riesgo de enfermedades del suelo.

Ilustración 14.

Tipos de sistemas de cultivo hidropónico.



Nota:

Iberdrola. (s. f.). ¿Qué es la hidroponía y cuáles son sus ventajas?, 2023

5.4.3. Sistema de control:

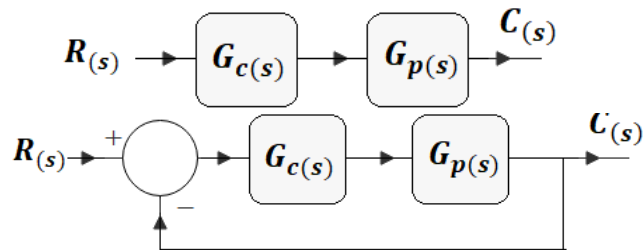
Un sistema de control es un conjunto de componentes interrelacionados que actúan en conjunto para controlar, supervisar, dirigir, o regular el funcionamiento de otros sistemas con el fin de garantizar que uno o más valores relevantes se encuentren dentro de un intervalo preestablecido. Según Martínez et al (2017), estos sistemas son importantes en diferentes ramas de la ingeniería, particularmente en la ingeniería agrícola contemporánea, en la que el manejo de los factores externos debe ser severo para mejorar el crecimiento de los cultivos. Los sistemas de control se pueden clasificar genéricamente en dos tipos: abiertos y cerrados. Los sistemas de control abierto no utilizan retroalimentación, a diferencia de los sistemas de control cerrado que utilizan controles automáticos basados en información recibida, lo que resulta en mayor exactitud y eficiencia.

En el contexto agrícola, un sistema de control desempeña un papel crucial al permitir la automatización de procesos, lo que reduce la dependencia de la intervención manual y aumenta la consistencia en la producción. Como señalan López et al. (2021), estos sistemas son particularmente útiles en invernaderos y sistemas hidropónicos, donde variables como la temperatura, la humedad relativa y la luz son

determinantes para el éxito del cultivo. El uso de tecnologías avanzadas, como la integración de controladores lógicos programables (PLC) y sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT), ha permitido una mayor capacidad de monitoreo y ajustes automáticos en tiempo real.

Además, los sistemas de control en la agricultura no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también contribuyen a la sostenibilidad. Según Gómez et al. (2020), la implementación de estos sistemas puede reducir significativamente el desperdicio de recursos como el agua y la energía, maximizando al mismo tiempo la producción. Por ejemplo, en sistemas de forraje verde hidropónico, un sistema de control de temperatura puede mantener un entorno óptimo para el crecimiento de las plantas durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas externas.

*Ilustración 15.
Tipos de sistemas de control.*



Nota: Dademuch Connection. (2021, 21 de febrero)

5.4.3. Sensor de temperatura:

Un sensor de temperatura es un dispositivo diseñado para detectar la temperatura en un entorno dado y transmitir esa información en una forma comprensible. Como explica Pérez et al. (2020), los sensores de temperatura son esenciales para la agricultura moderna ya que no solo miden las condiciones térmicas, sino que también pueden controlarlas, lo cual es muy importante para la producción de cultivos. Estos sensores pueden operar sobre diferentes principios, como la resistencia eléctrica (RTD), la termoelectricidad (termopares) o la capacitancia sensible a la temperatura.

En invernaderos y sistemas de cultivo hidropónico, los sensores de temperatura permiten la medición continua de las condiciones internas y aseguran que se mantengan los rangos óptimos para el crecimiento de las plantas. Como señala López et al. (2021), estos sensores se utilizan comúnmente en sistemas automatizados de control ambiental donde los datos recopilados se usan para activar sistemas de calefacción, ventilación o aire acondicionado. Además, la integración de estos sensores con tecnologías IoT también permite un monitoreo

remoto y en tiempo real, lo que mejora la eficiencia operativa y facilita la toma de decisiones a tiempo.

Un aspecto clave de los sensores de temperatura es su capacidad para trabajar en conjunto con sistemas de control para optimizar el uso de recursos. Según Gómez et al. (2020), al garantizar una temperatura constante y adecuada, estos sensores ayudan a mejorar no solo la calidad del producto final, sino también la sostenibilidad del sistema de producción. En sistemas como el forraje verde hidropónico, un monitoreo preciso de la temperatura puede prevenir problemas asociados con condiciones adversas, como el estrés térmico en las plantas, asegurando una producción consistente y de alta calidad.

*Ilustración 16.
Sensor de temperatura.*



Nota: Fuente propia, 2024

5.4.3. Lazo abierto y lazo cerrado:

Un sistema de control de lazo cerrado se considera aquel en el que la salida del sistema no tiene efecto en el proceso de control, lo que significa que la señal de entrada se produce sin tener en cuenta el resultado eventual. En un estudio de Martínez et al (2019), los autores mencionan que estos sistemas son simples y económicos, pero no poseen autorregulación. Por ejemplo, en un sistema de riego de lazo abierto, el agua se proporciona en intervalos preestablecidos independientemente de si el suelo necesita o no humedad. Esta estrategia es beneficiosa cuando las condiciones externas son fijas y predecibles.

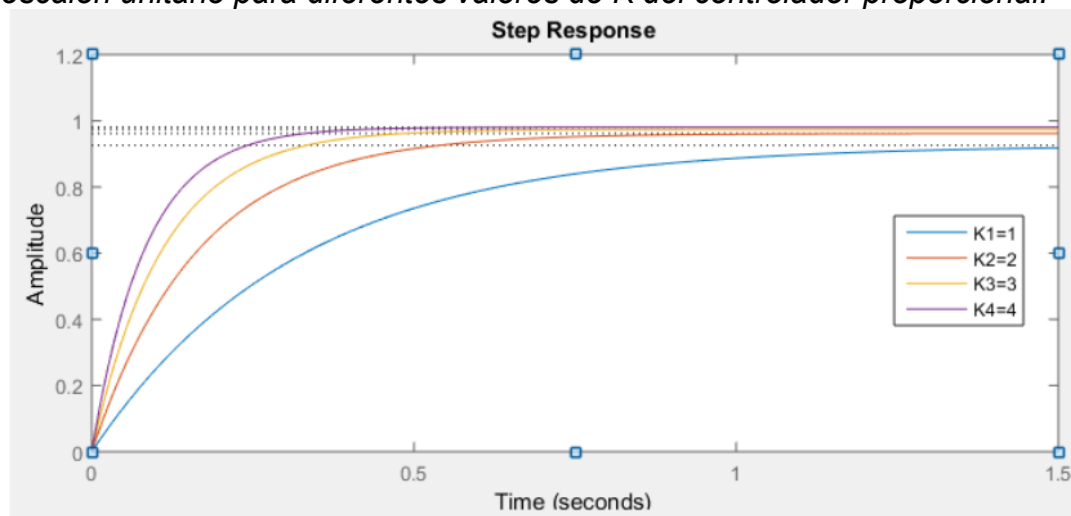
Por el contrario, los sistemas de lazo cerrado emplean retroalimentación a las acciones del sistema a la salida del sistema basada en la diferencia entre la salida real y la salida prevista. En estos sistemas, los sensores son esenciales para la función de monitoreo, ya que miden la salida y envían información al controlador, quien modifica las entradas al sistema para lograr estabilidad. Según un artículo de

Gómez y Torres (2021), los sistemas de lazo cerrado, como los utilizados en invernaderos automatizados, permiten mantener parámetros óptimos como la temperatura, la humedad y la luz, independientemente de las fluctuaciones externas.

La principal diferencia entre ambos radica en la presencia de un mecanismo de retroalimentación en el lazo cerrado. Investigaciones realizadas por Sánchez et al. (2020) indican que, aunque los sistemas de lazo cerrado suelen ser más costosos debido a su complejidad y necesidad de sensores avanzados, ofrecen una mayor eficiencia y precisión en el control.

Ilustración 17.

Respuesta en el tiempo del sistema de primer orden a lazo cerrado, a la entrada escalón unitario para diferentes valores de K del controlador proporcional.



Nota: Dademuch Connection. (2021, 21 de febrero)

5.5. MARCO LEGAL

5.5.1. Normativas Agrícolas:

- Ley 101 de 1993: Establece normas para el desarrollo de la agricultura en Colombia, promoviendo la modernización y la eficiencia en la producción agrícola.
- Decreto 1843 de 2014: Reglamenta aspectos relacionados con la agricultura sostenible y establece lineamientos para la producción de alimentos bajo prácticas amigables con el medio ambiente.

5.5.2. Regulaciones Ambientales:

- Ley 99 de 1993: Establece el marco general para la gestión del medio

ambiente en Colombia, promoviendo la conservación de los recursos naturales y la prevención de la contaminación.

- Decreto 1076 de 2015: Define los instrumentos de gestión ambiental y establece los requisitos para la expedición de licencias ambientales en actividades agrícolas.

5.5.3. Seguridad Alimentaria:

- Ley 1505 de 2012: Establece el Sistema Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (SISAN), promoviendo el acceso oportuno y suficiente a alimentos de calidad.
- Resolución 2674 de 2013: Reglamenta los requisitos sanitarios y de calidad para la producción, almacenamiento, transporte y comercialización de alimentos en Colombia.

5.5.4. Normativas Específicas para la Producción Agrícola:

- Resolución 2532 de 2017: Establece los requisitos para la producción de alimentos orgánicos, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y el uso responsable de recursos naturales.
- Decreto 300 de 2019: Regula aspectos relacionados con la producción agrícola en invernaderos, incluyendo requisitos de construcción, manejo de residuos y protección ambiental.

5.5.5. Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) – ICA:

- Resolución 30021 de 2017: Establece los requisitos para la certificación en Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en Colombia, garantizando la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y el bienestar de los trabajadores agrícolas.
- Resolución 3751 de 2021: Define los lineamientos técnicos para la implementación de BPA en cultivos hidropónicos, promoviendo prácticas adecuadas en el uso del agua, fertilización y manejo de residuos en sistemas de producción sin suelo.

5.5.6. Regulaciones Internacionales sobre Hidroponía – USDA

Normativa del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA):

- La National Organic Program (NOP) regula la producción orgánica, incluyendo sistemas hidropónicos, estableciendo que los cultivos deben cumplir con estándares de manejo sostenible y prácticas de conservación del suelo y agua.
- La Hydroponic & Aquaponic Task Force Report (2016) proporciona directrices sobre la certificación de cultivos hidropónicos dentro del sistema orgánico del USDA.
- Los Good Agricultural Practices (GAP) del USDA incluyen directrices sobre higiene, manejo del agua y control de enfermedades en la producción hidropónica.

5.5.7. Regulaciones Locales y Municipales:

- Debe cumplir con las normativas locales establecidas por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), que regula el uso del suelo y las actividades agrícolas. Además, es esencial cumplir con las directrices de CORPOBOYACÁ sobre el uso sostenible del agua y la protección de recursos naturales, así como con las normativas municipales de gestión de residuos generados en el proceso.

5.5.8. Normas de Calidad y Mejora Continua:

- Norma UNE ISO 13053-1:2011: Establece los principios y directrices del Six Sigma, una metodología enfocada en la mejora continua de procesos a través de la reducción de la variabilidad y los defectos.
- Norma UNE ISO 13053-2:2011: Complementa la anterior, proporcionando herramientas y técnicas estadísticas para analizar y mejorar los procesos productivos.
- Norma UNE ISO 18404 (AENOR): Especifica las competencias y requisitos para la certificación en Six Sigma y Lean, estableciendo criterios de competencias necesarias para proyectos de optimización de procesos.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

Se eligió implementar un enfoque cuantitativo, ya que este nos permite evaluar el impacto que tiene el control de temperatura Enel cultivo del forraje verde hidropónico en entornos diferentes, este tipo de metodología los permite obtener una recolección y análisis de datos numéricos con objetividad y precisión. Según Creswell (2014), los estudios cuantitativos son parte fundamental para la medición de variables específicas y para establecer correlaciones entre factores que puedan llegar a afectar la producción agrícola.

Con relación a esto, se centra esta investigación en realizar una medición exacta del comportamiento que tiene la temperatura en los cultivos de FVH, esto por medio de herramientas estadísticas que recopilan y analizan datos. Según el estudio de López et al. (2020), usar datos cuantificables es primordial para realizar la validación de tecnologías agrícolas innovadores, y de esta manera mejorar la eficiencia de los procesos productivos.

Para respaldar la confiabilidad de los resultados obtenidos, se emplearon sensores de temperatura, además de un sistema de monitoreo automatizado, lo cual nos permitió obtener una recopilación continua de la información condiciones ambientales diferentes. Posteriormente a ellos los datos fueron procesados, de esta manera se facilitó la comparación rendimiento entre el forraje antes y después que se implementara el sistema de control térmico.

Los resultado que se obtuvieron, permitieron que se demostrar de una manera objetiva la influencia que tiene el sistema de control de temperatura respecto a la productividad del FVH, de esta manera se evidencio mejoras tanto en la uniformidad del crecimiento como en la reducción de variaciones en el desarrollo del cultivo, según investigaciones como la de García et al. (2018), en donde apoya el uso de enfoques cuantitativos, en procesos agrícolas para su optimización, ya que estos proporciona datos medibles y gracias a ellos se pueden tomar decisiones.

El enfoque cuantitativo que se aplicó en este estudio permitió que se obtuvieran medidas precisas, además de análisis estadísticos confiables sobre el impacto que tiene el sistema de control de temperatura en la producción del VH, ya que esta metodología constituye una herramienta fundamental para validar mejoras en los sistemas agrícolas y optimizar el rendimiento del cultivo a través del análisis de datos objetivos.

6.2. DISEÑO METODOLÓGICO

Debido a que esta investigación se basa en la ejecución de un proyecto práctico en el cual se incluye el diseño e implantación de un invernadero, pruebas de germinación con y sin control de temperatura, recolección de datos, análisis de resultados, formulación de conclusiones y recomendaciones, se opta por una metodología experimental. Debido a que este enfoque permite la evaluación sistemática de los efectos del control de temperatura en la producción del FVH en el municipio de Moniquirá, Boyacá, de esta manera garantizando resultados cuantificables que contribuyen a la optimización del proceso.

En esta investigación experimental, se realizan pruebas de germinación a través de diferentes condiciones de temperatura, de esta forma se mide el impacto en el crecimiento del cultivo. Este enfoque permite que se puedan manipular variables como la temperatura, y también nos permite obtener observaciones de los efectos que esta tiene sobre el desarrollo de las plantas, facilitando asimismo el análisis del comportamiento, a través de la recopilación de los datos obtenidos de las mediciones, esto mediante los procesos de germinación y crecimiento del FVH.

No obstante, tanto el montaje del invernadero y la implantación de las pruebas hacen parte del diseño experimental, de esta forma asegurando condiciones controladas para validar los resultados. En estos entornos se hace posible un análisis detallado sobre la viabilidad y efectividad del sistema de control de temperatura en el cultivo de FVH. La metodología de este proyecto se estructura en varias fases para lograr cumplirse y de esta forma se integró la experimentación con énfasis en lean manufacturing, de esta forma mejorando la eficiencia del proceso y reduciendo los desperdicios:

1. **Diseño Experimental:** Proceda a elaborar un plan de instrucciones para pruebas de germinación, incluyendo el diseño de grupos de control y experimentales, además de las variables que serán observadas y medidas durante los procesos. Este diseño permitirá una comparación rigurosa entre las condiciones de control de temperatura y las de no control.
 - **Construcción:** El diseño y la construcción de invernaderos está especializada a las condiciones locales y se realiza utilizando principios de Manufactura Esbelta para reducir el uso de materiales y mejorar la eficiencia del espacio.
 - **Equipamiento:** Instalación del equipo necesario para el control de temperatura y el monitoreo del cultivo.

2. **Implementación del Invernadero y Pruebas:** El invernadero se construirá según las especificaciones proporcionadas y, posteriormente, se realizarán

pruebas de germinación bajo ambas condiciones. En esta etapa, los datos sobre el crecimiento de la planta, la temperatura ambiental, la humedad, etc. serán capturados sistemáticamente

- **Pruebas Iniciales:** Las pruebas de germinación iniciales incluirán condiciones de temperatura controladas y condiciones de temperatura no controladas. Las pruebas incluirán grupos experimentales controlados establecidos para evaluar directamente el impacto del control de temperatura.
 - **Método:** Las pruebas se llevarán a cabo de manera controlada y sistemática, permitiendo replicaciones e imposiciones de controles estrictos sobre las variables.
1. **Recolección de Datos:** Se realizará una recolección sistemática de los datos generados durante las pruebas de germinación, utilizando instrumentos de medición precisos y registros detallados. Esta fase garantizará la obtención de información completa y fidedigna para su posterior análisis.
 - **Tecnología:** Implementación de sistemas de monitoreo continuo para la recolección de datos precisos sobre temperatura, crecimiento y eficiencia del sistema.
 - **Optimización Lean:** Aplicación de técnicas de Lean Manufacturing para analizar y optimizar el flujo de trabajo, reducir desperdicios y mejorar la eficiencia general del sistema.
 2. **Análisis de Datos:** Una vez finalizadas las pruebas, se procederá con el análisis exhaustivo de los datos recolectados, utilizando herramientas estadísticas y métodos de evaluación pertinentes. Este análisis permitirá identificar patrones, tendencias y relaciones significativas entre las variables estudiadas.
 - **Métodos Estadísticos:** Utilización de herramientas estadísticas para analizar los datos recolectados, identificar patrones y evaluar la efectividad del control de temperatura.
 - **Evaluación de Eficiencia:** Evaluación de la eficiencia del sistema para reducir desperdicios, costos y mejorar la calidad del forraje.
 3. **Conclusiones y Recomendaciones:** Basándose en los resultados del análisis de datos, se formularán conclusiones claras y fundamentadas sobre la eficacia del control de temperatura en la producción de forraje verde hidropónico. Además, se elaborarán recomendaciones prácticas para futuras investigaciones o prácticas agrícolas en la región.
 - **Resultados:** Formulación de conclusiones basadas en los resultados del

análisis de datos, destacando la eficacia del control de temperatura y los beneficios de las prácticas Lean Manufacturing.

- **Recomendaciones:** Desarrollo de recomendaciones para futuras investigaciones y prácticas agrícolas, enfocadas en la implementación de sistemas de cultivo eficientes y sostenibles.

*Tabla 2.
Metodología de objetivos*

TAREA	TIPO DE METODOLOGÍA	OBJETIVO	METODOLOGÍA	ACTIVIDADES	RESULTADOS
1	Descriptiva	Caracterizar el proceso de producción de forraje verde hidropónico identificando las posibles áreas de mejora mediante un estudio detallado de tiempos y su relación con la temperatura.	Observación directa del proceso de producción actual. Estudio de tiempos y movimientos. Análisis de la relación entre temperatura y productividad.	Recopilación de datos en tiempo real. Medición de temperaturas durante las distintas etapas del cultivo. Identificación de cuellos de botella.	Informe detallado con las áreas de mejora identificadas, incluyendo un diagnóstico del impacto de la temperatura en la producción.
2	Descriptiva	Diseñar un prototipo de invernadero para el cultivo de forraje verde hidropónico que facilite el análisis de temperatura mediante la automatización del sistema.	Diseño asistido de fuente de alimentación para el sistema. Análisis de viabilidad técnica y económica.	Creación de sistema de control y especificaciones técnicas. Selección de materiales y componentes necesarios para el invernadero automatizado.	Modelo detallado del invernadero con sistemas automatizados de control de temperatura y especificaciones técnicas listas para implementación.

3	Experimental	Implementar un sistema de control de temperatura en el cultivo de forraje verde hidropónico que mejore la producción mediante el monitoreo y ajuste automatizado de la temperatura.	Instalación del sistema de control automatizado. Monitoreo continuo de las condiciones de temperatura.	Configuración de sensores y actuadores. Pruebas piloto de funcionamiento.	Sistema de control de temperatura en pleno funcionamiento, optimizando las condiciones del cultivo y mejorando la producción.
4	Experimental	Evaluar los resultados del proceso de control de temperatura en la producción de forraje verde hidropónico (FVH), mediante la comparación de la producción antes y después de su implementación.	Análisis comparativo de datos de producción. Evaluación cualitativa y cuantitativa del impacto del sistema implementado.	Recolección de datos antes y después de la implementación. Análisis estadístico. Generación de análisis comparativos.	Informe de evaluación que demuestre la mejora en la producción y los beneficios del sistema implementado, con recomendaciones finales.

Nota: Fuente propia, 2024

6.3. HIPÓTESIS

La implementación de un sistema de producción de cultivo de forraje verde hidropónico en un invernadero con control de temperatura permitirá obtener una producción continua y estandarizada en zonas rurales. Esto se debe a que el ambiente cerrado del invernadero reducirá la influencia de condiciones climáticas extremas, insectos y plagas, al tiempo que se mantiene un control preciso y constante de una de las variables clave para el crecimiento. Como resultado, se espera lograr una calidad consistente y tiempos de cultivo estándares. En contraste, el cultivo en un entorno rural abierto, sin un control constante, podría generar dificultades significativas para el crecimiento y desarrollo del forraje debido a la variabilidad de las condiciones ambientales y la exposición a factores externos. La estandarización del forraje verde permitirá proporcionar una alimentación

balanceada a los animales destinatarios, suministrándoles los nutrientes necesarios para su óptimo desarrollo.

Esta hipótesis plantea que el modelo de línea de producción en zonas rurales, con cultivo de forraje verde hidropónico en un invernadero y control de temperatura, puede ofrecer beneficios en términos de producción continua, estandarización de calidad, tiempos de cultivo y una alimentación balanceada para los animales destinatarios, contribuyendo así al desarrollo sostenible y eficiente de la producción agrícola rural.

6.4. PLOBACIÓN Y MUESTRA

El forraje verde hidropónico, es un cultivo que se lleva a cabo en el campo mayormente en invernaderos, generando una ayuda a los campesinos, ya sea para su venta o para el uso de este como alimento nutricional para sus animales de finca, como ganado, gallinas, cerdos, entre otros, sin embargo, el cultivo de forraje verde no es muy común en Colombia, por ende, la población a seleccionar será a pequeños campesinos que realicen crianza de ganado, ya que es una de las más comunes, y nuestra muestra será una pequeña finca dedicada a la ganadería en la Moniquirá Boyacá.

7. RECURSOS

A continuación, se presenta la tabla de recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto de automatización de un cultivo de forraje verde hidropónico, en un invernadero casero, con dos bandejas para germinación de semillas.

*Tabla 3.
Recursos del proyecto*

Cant.	Rubro	Detalle	Unidad	Valor	Valor Total
2	Personal	Estudiante investigador	Hora	\$ -	\$ -
1		Docente director	Hora	\$ -	\$ -
1	Software	Licencia estándar	EasyEDA	\$ 902.620	\$ 902.620
1		Licencia estándar	Autodesk inventor	\$ 15.705.590	\$ 15.705.590
10	Estructura	Tubos PVC	Metro	\$ 10.000	\$ 100.000
1		Lampara	unidad	\$ 90.000	\$ 90.000
8		Uniones de 3	Unidad	\$ 10.000	\$ 80.000
8		Uniones de 3 ángulo	Unidad	\$ 10.000	\$ 80.000
2		Polietileno	Metro ²	\$ 5.000	\$ 10.000
2		Bandejas	Unidad	\$ 55.000	\$ 110.000
1	Hardware	Actuador	Unidad	\$ 75.000	\$ 75.000
1		Arduino	Unidad	\$ 32.000	\$ 32.000
1		Sensor	Unidad	\$ 14.000	\$ 14.000
1	Equipos	Herramienta manual	Unidad	\$ -	\$ -
2		Computador	Unidad	\$ -	\$ -
3	Materia prima	Semilla de maíz	Kilos	\$ 13.188	\$ 39.564
1	Imprevistos	NA		\$ 200.000	\$ 200.000
					\$ 17.438.774

Nota: Fuente propia, 2024

8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FVH

Para realizar la caracterización detallada del proceso de la producción de forraje verde hidropónico (FVH), se realizó un estudio basado en la observación directa del cultivo, la recopilación de datos del comportamiento de las variables del cultivo en tiempo real, generando un análisis de las variables que podrían llegar a ser críticas en este sistema.

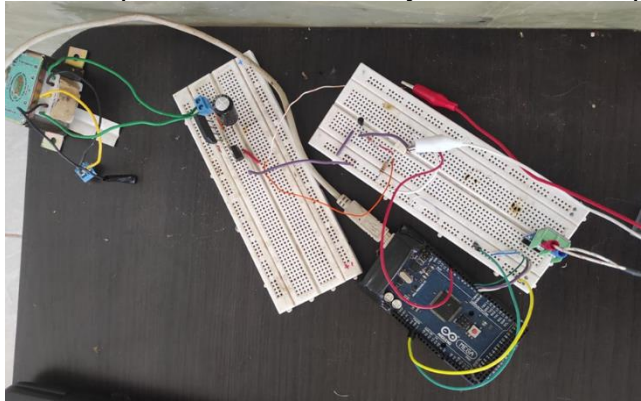
También se realizó un estudio de información acerca de las necesidades del cultivo, esto mediante revisión de literatura técnica de hidroponía y cultivos de FVH, en base a esto se lograron identificar varios factores fundamentales para obtener un crecimiento óptimo del FVH, como lo son la temperatura y humedad del sistema, la calidad del agua y pH suministrado al cultivo, el tipo de semilla requerido y los tiempos de germinación.

Esta recolección de datos se llevó a cabo por medio de mediciones seguras durante el ciclo productivo del cultivo, para ello se instalaron sensores, lo que permitió una lectura de la temperatura del cultivo en intervalos regulares, de este modo se lograron establecer las condiciones óptimas del cultivo y se detectaron variaciones que podrían llegar a afectar el desarrollo del mismo; paralelo a esto, se realizó un análisis de tiempo y movimientos en el proceso de producción, lo que nos logró evidenciar posibles cuellos de botella que podrían afectar la eficiencia de la producción.

La adquisición de datos es un requisito fundamental para analizar el desarrollo del cultivo. Por medio de este proceso se lleva a cabo el monitoreo continuo a lo largo del día, esto permite registrar los cambios de temperatura a los que está expuesto el cultivo en tiempo real, analizando los resultados se puede evaluar el impacto que tiene el control de temperatura en el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Ilustración 18.

Circuito para toma de datos y control de temperatura.



Nota: Fuente propia, 2023

8.2. DISEÑO DE PROTOTIPO DE INVERNADERO PARA ANÁLISIS DE TEMPERATURA

El diseño de sistema de control de temperatura del forraje verde hidropónico fue desarrollado con el objetivo de garantizar que el cultivo contara con una eficiencia operativa y una estabilidad en la temperatura durante todo su crecimiento, dado que dichas variables son un factor clave en la optimización de la producción y la calidad del forraje. Para generar un prototipo adecuado, se implementaron herramientas de software que permitieron el modelamiento y optimización de la estructura física del invernadero como los circuitos eléctricos y su ubicación, asegurándose el correcto funcionamiento del control de temperatura.

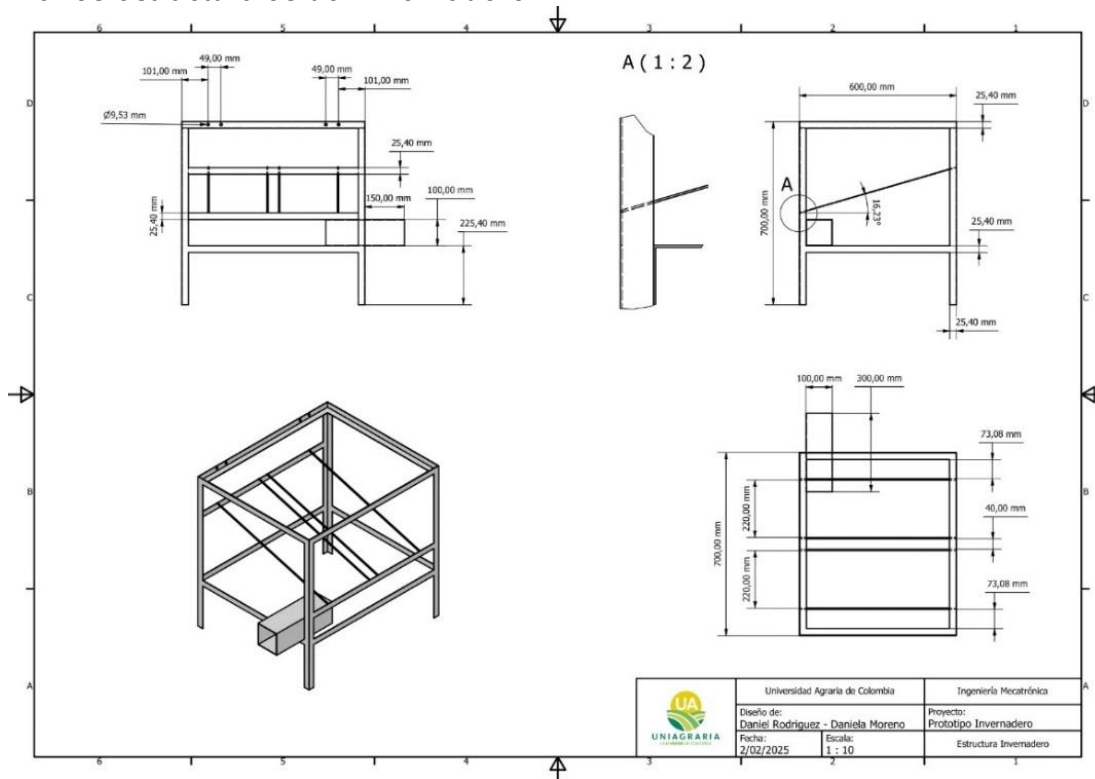
Parte esencial para validar y simular antes de implementar algún sistema, es el uso de herramientas de software, en este caso, se hizo uso de herramientas como Autodesk inventor para realizar el modelamiento y simulación de la estructura del invernadero, esto permitió analizar aspectos como la distribución de espacios, lo cual permite garantizar que la estructura sea la adecuada para mantener las condiciones climáticas óptimas.

El tema mencionado anteriormente, la simulación y el diseño del sistema de control de temperatura, se realizó en un software de EasyEDA, el cual se especializa en el diseño y la simulación de circuitos electrónicos. Gracias a esta herramienta, se pudo desarrollar el circuito de control que procesa la temperatura dentro del invernadero y se pudo localizar y corregir los errores en las conexiones del circuito antes de realizarlas. Esto permite minimizar los riesgos y mejorar el funcionamiento global del sistema.

Así mismo el sistema de control de temperatura fue diseñado específicamente para mantener las condiciones óptimas de producción del cultivo de forraje verde hidropónico, para esto se estableció un rango de temperatura entre 25 y 30 °C, con una variabilidad controlada no mayor al 1.4%. Este objetivo se alcanzó, implementando un circuito de potencia que suministra energía a los actuadores térmicos y electromecánicos, los cuales ajustan automáticamente la temperatura de acuerdo los datos obtenidos por medio de los sensores.

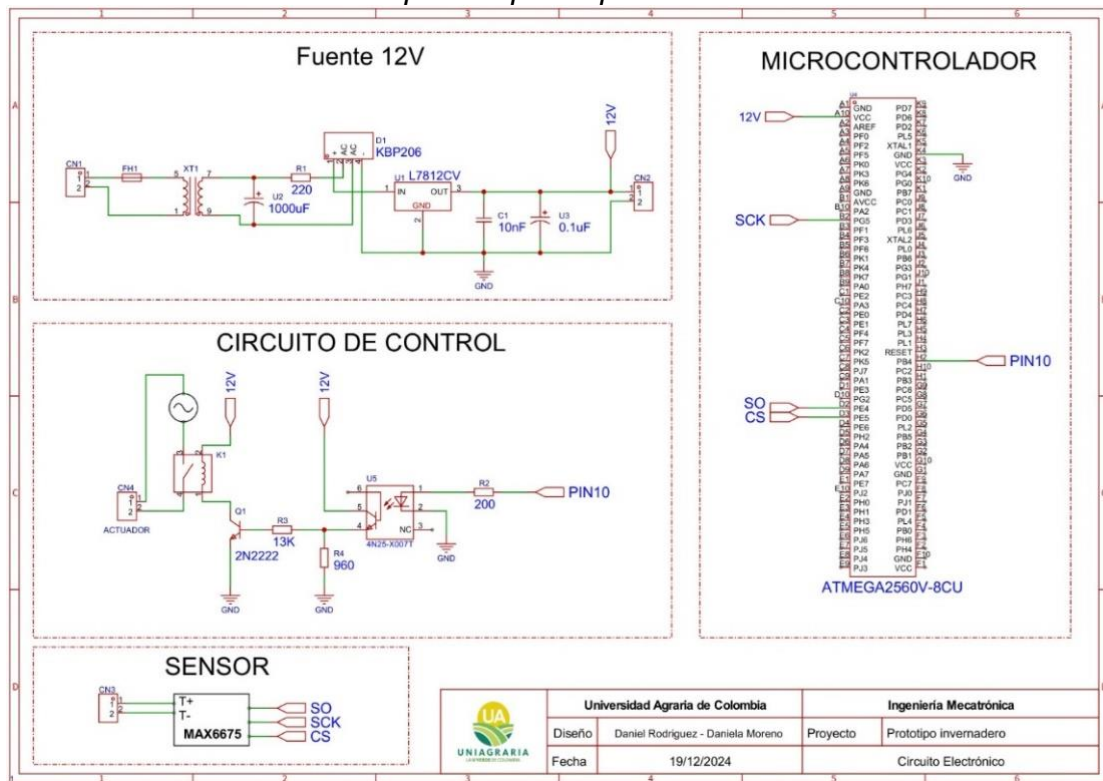
Además, se diseñó un circuito regulador de voltaje aislado galvánicamente del circuito de potencia. Este sistema es esencial para garantizar una distribución eficiente y estable de la energía en corriente directa (D.C.), lo que permite la adquisición de datos en tiempo real y un ajuste automatizado de la temperatura sin interferencias eléctricas que puedan comprometer la precisión del control.

Ilustración 19.
Planos estructurales del invernadero



Nota: Fuente propia, 2025

Ilustración 20.
Diseño del circuito eléctrico para el prototipo de invernadero



Nota: Fuente propia, 2025

8.2.1. Diseño fuente de alimentación:

Para el diseño de la fuente de alimentación, se consideraron los requisitos energéticos del microcontrolador Atmega2560 que se encuentra en la tarjeta de desarrollo Arduino mega2560, la cual es responsable de monitorear y controlar la temperatura del invernadero, así como el voltaje de operación del relevador utilizado para activar o desactivar la resistencia calefactora según las necesidades térmicas del sistema.

De acuerdo con la hoja de datos del Arduino, la placa de desarrollo contiene un regulador interno para proteger el microcontrolador cuando el suministro de energía se realiza por una fuente de voltaje externa, el voltaje externo recomendado para su operación se encuentra en el rango de 7 a 12V. Un voltaje inferior a este rango puede causar que el pin de 5V del Arduino proporcione un voltaje insuficiente, lo que afecta la estabilidad de la placa. Por otro lado, un voltaje superior al límite recomendado puede provocar el sobrecalentamiento del regulador de la tarjeta, comprometiendo su funcionamiento.

El diseño de la fuente se subdivide en 4 etapas transformación, rectificación, filtrado y regulación:

- **Ttransformación:** Se empleó un transformador para reducir el voltaje de la red eléctrica domiciliaria de 120 voltios a un voltaje de 18 voltios, para que la tensión se más manejable y que los dispositivos electrónicos no tenga que disipar potencias elevadas.
- **Rectificación:** se empleó el puente rectificador GBL06, permitió la conversión de corriente alterna a corriente directa, en esta etapa se dio una caída de tensión descrita por las siguientes ecuaciones:

Voltaje pico del secundario se obtiene a partir de la ecuación 1

$$V_{RMS} = \frac{V_p(sec)}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Despejando la ecuación 1 y reemplazando los valores, se obtiene el voltaje pico en el secundario, como se observa en la ecuación 2

$$V_p(sec) = 19,7 V * \sqrt{2} = 27,86 V \quad (2)$$

Con el resultado de la ecuación 2 se calcula el voltaje DC empleando la ecuación 3

$$V_{DC} = 2 * \frac{V_p(sec)}{\pi} \quad (3)$$

Reemplazando en la ecuación 3, se obtiene el voltaje DC después de la rectificación, como se muestra en la ecuación 4

$$V_{DC} = 2 * \frac{27,86}{\pi} = 17,73 V \quad (4)$$

- **Filtrado:** Se emplea un capacitor de 100µF después de la etapa de rectificación para suavizar la señal rectificada, el voltaje rizo obtenido se obtiene de la siguiente ecuación.

$$V_r = \frac{I_{DC}}{2 * f * C} \quad (5)$$

Reemplazando en la ecuación 5, se obtiene el voltaje rizo en la ecuación 6

$$V_r = \frac{150 \text{ mA}}{2 * 60 \text{ Hz} * 1000 \mu\text{F}} = 1,25 \text{ V} = (6)$$

De este modo obtenemos el valor del factor de rizado reemplazando en la ecuación 7

$$r = \frac{V_{RMS}}{V_{DC}} * 100 (7)$$

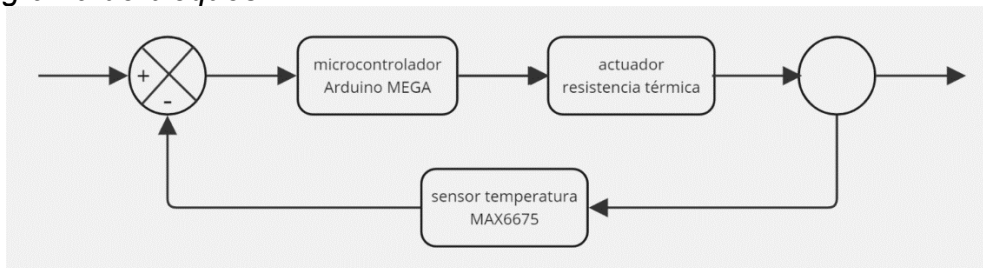
$$r = \frac{1,25}{17,73} * 100 = 7\% (8)$$

- **Regulación:** En esta etapa se empleó un circuito integrado regulador de voltaje L7812CV el cual tiene un rechazo al rizo de 55 dB, por lo que genera un ruido de 75µV por cada voltio de salida, un ruido despreciable dentro de la aplicación de la fuente, una importante ventaja, ya que evita que se emplee un filtro más robusto. Se implemento un capacitor de 1000µF, en la entrada del regulador lineal con el objetivo de disminuir el factor de rizado al 7% (ecuación 8)

8.2.2. Diseño controlador:

Según los parámetros de temperatura para el crecimiento ideal del cultivo de FVH, se diseñó un controlador retroalimentado por un sensor de temperatura que realizo la toma de datos dentro del invernadero a partir de esto, se estableció un valor de 28°C como referencia de temperatura, el microcontrolador envía una señal de encendido cuando la variable controlada es inferior al set-point, por otro lado cuando la temperatura sea igual o mayor a la referencia envía una señal de apagado del actuador.(Ilustración 20)

*Ilustración 21.
Diagrama de bloques*



Nota: Fuente propia, 2024

Para implementar el controlador y garantizar el correcto funcionamiento de este se tuvo en cuenta las especificaciones técnicas de funcionamiento del microcontrolador Atmega2560 el cual en sus puertos GPIO trabajan con tensiones en DC (Atmel Corporation, 2014, p. 25), ya que la señal a controlar es en AC, para proteger el microcontrolador se realizó una etapa de aislamiento por medio de un optoacoplador.

La etapa de aislamiento se diseñó teniendo en cuenta la hoja de datos del optoacoplador 4N25 (alldatasheet 4N25), donde especificó que la potencia del led es de 120mW con este dato se calcula la resistencia para garantizar este parámetro

$$P = I * V \quad (9)$$

Despejando la ecuación 9 se obtiene la corriente que necesita el led para su funcionamiento

$$I = \frac{120mW}{5V} = 24mA \quad (10)$$

Teniendo la corriente su cálculo la resistencia para el led aplicando la ley de ohm

$$R = \frac{5V}{24mA} = 200 \Omega \quad (11)$$

El transistor de salida del optoacoplador se utilizó para transportar la señal de control que se envía de manera foto-aislada desde la placa de desarrollo, el fototransistor interno disipa una potencia máxima de 150mW (alldatasheet 4N25), calculando la corriente de colector a partir de la ecuación 10 se obtuvo:

$$I_c = \frac{150mW}{12V} = 12,5mA \quad (12)$$

Con la corriente de colector se calculó la resistencia de carga

$$R_l = \frac{12V}{12,5mA} = 960\Omega \quad (13)$$

El transistor 2N2222 recibe la señal de control que envía el optoacoplador, de esta manera a su vez controlar el relevador JQX-13F el cual según su hoja de datos (alldatasheet JQX-13F) para un voltaje de 12V tiene una resistencia de 160 Ω , con esta resistencia se calcula la corriente de colector empleando la ley de ohm

$$I_c = \frac{12V}{160} = 75 mA \quad (14)$$

Con la corriente de colector se calcula la corriente de base teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$I_c = I_b \beta \quad (15)$$

$$I_b = \frac{75mA}{90} = 833 \mu A \quad (16)$$

Para este caso se tomó un $\beta = 90$ (alldatasheet 2N2222) por lo que se obtuvo una corriente de base de $833 \mu A$, con esto se realizó la malla en la base para determinar R_b . La malla quedo de la siguiente forma

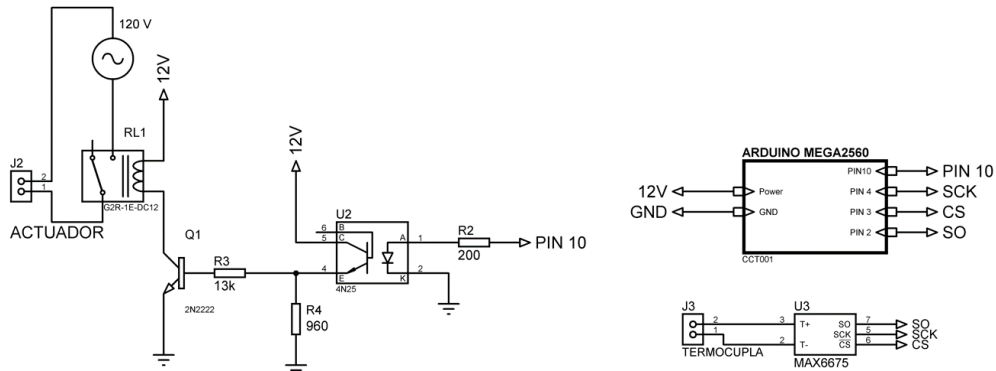
$$-12 + 833 \mu A * R_b + 0,7 = 0 \quad (17)$$

Despejando la ecuación 17, se obtuvo

$$R_b = \frac{11,3}{833 \mu A} = 13560 \Omega \quad (18)$$

Con los cálculos anteriores se garantizó un correcto funcionamiento del sistema de control, (Ilustración 2)

Ilustración 22.
Esquemático electrónico



Nota: Fuente propia, 2023

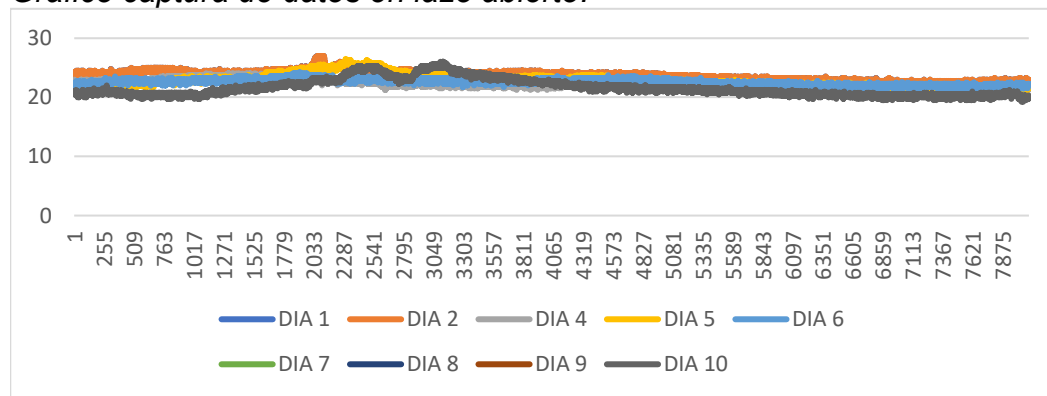
La adquisición de los datos como se muestra en la (Ilustración 21) se realizó por medio del módulo MAX6675, el módulo cuenta con una compensación de unión fría que permite sumar o restar un voltaje a la termocupla para establecer la referencia en $0^{\circ}C$, los datos se transmiten en un formato de solo lectura compatible con SPIM

y con una resolución de 12 bits o 0,25°C según la hoja de datos del fabricante (alldatasheet MAX6675).

La adquisición de los datos fue fundamental para determinar el comportamiento del sistema en lazo abierto y en lazo cerrado, en lazo abierto en los diferentes escenarios de prueba se evidencio que el sistema no llega a la temperatura ideal para el crecimiento del FVH, ya que la temperatura máxima que alcanzo el invernadero en esta condición fue de 25°C, la cual se mantuvo durante un corto periodo de tiempo en cada uno de los días de prueba como se evidencia en la Ilustración 22.

Ilustración 23.

Gráfico captura de datos en lazo abierto.

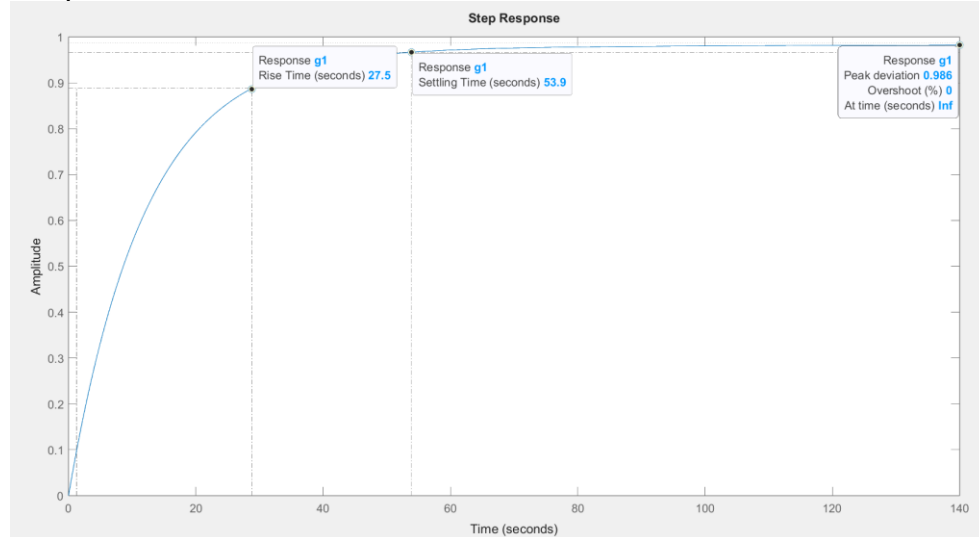


Nota: Fuente propia, 2023

A partir de la adquisición de los datos experimentales del sistema en lazo cerrado se utilizó el software de Matlab en donde se determinó la función de transferencia de la planta controlada por el on-off (ecuación 19), esto permitió conocer la respuesta del controlador y su comportamiento en el tiempo.

$$G(s) = \frac{0,08151 s + 0,0007901}{s^2 + 0,09334 s + 0,000801} \quad (9)$$

*Ilustración 24.
Respuesta del controlador*



Nota: Fuente propia, 2024

8.3. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE TEMPERATURA

El requerimiento principal del proyecto consistió en asegurar la temperatura óptima dentro del invernadero, comprendida entre los 28°C y 30°C, asegurando el adecuado desarrollo del Forraje Verde Hidropónico (FVH). Esto se llevó a cabo implementando un sistema de ventilación forzada y un sistema de monitorización de temperatura que incluye un sensor de temperatura, un ventilador y una resistencia térmica, estos dispositivos inyectan aire caliente al interior del invernadero, para aumentar la temperatura cuando sea necesario. Adicionalmente, se dejó una rejilla que permite la salida del aire y los gases generados durante la germinación de las semillas, garantizando un ambiente adecuado para el cultivo.

La germinación de las semillas se ejecutó en tres etapas diferentes: selección, limpieza y desinfección, pregerminado y germinación. Cada etapa fue ejecutada bajo parámetros controlados para asegurar el éxito del cultivo hidropónico, incluyendo un control de temperatura constante a 28 °C, valor óptimo para maximizar el desarrollo del forraje verde

- **Selección limpieza y desinfección:** Durante esta fase inicial, se seleccionaron cuidadosamente las semillas, eliminando aquellas con daños visibles o residuos, con el fin de evitar la proliferación de patógenos, como hongos. La limpieza y desinfección de las bandejas de germinación y las semillas se realizó mediante una solución de hipoclorito de sodio al 0,2% (2 mL de NaClO por litro de agua), asegurando una correcta eliminación de microorganismos. Las semillas se sumergieron en la solución durante 15 minutos, tiempo determinado para evitar posibles daños en el embrión debido a una exposición prolongada

Ilustración 25.

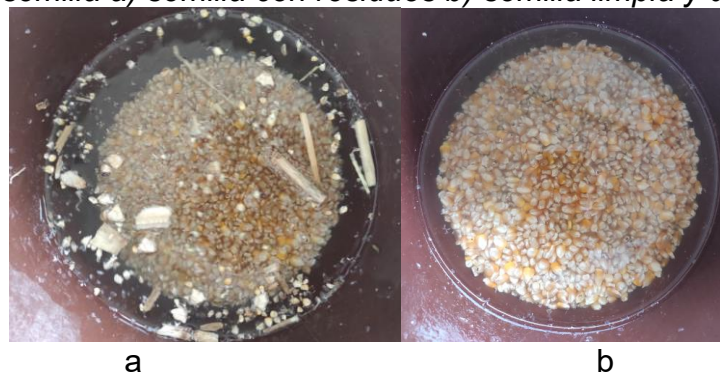
Muestra calidad de semilla a) calidad optima b) mala calidad y c) calidad regular



Nota: Fuente propia, 2023

Ilustración 26.

Lavado de la semilla a) semilla con residuos b) semilla limpia y desinfectada



Nota: Fuente propia, 2023

- **Pregerminado:** En esta etapa, las semillas fueron sometidas a un proceso de activación, consistente en una inmersión de 24 horas en agua limpia y oxigenada. Este proceso permite que las semillas rompan su estado de latencia, promoviendo una mayor eficiencia en la germinación al asegurar una adecuada hidratación de los tejidos internos. La ilustración 25 b) evidencia la forma que se empleó para el pregerminado.
- **Germinación:** Posteriormente, las semillas fueron distribuidas homogéneamente en bandejas, asegurando un contacto adecuado entre ellas para simular la presencia de un sustrato, favoreciendo el enraizamiento. Se estableció un régimen de riego de tres veces al día con agua. Durante los primeros cuatro días, la intensidad lumínica fue reducida mediante la cobertura de las bandejas con plástico oscuro, lo que estimuló la elongación de los tallos y el desarrollo inicial de las hojas. A partir del quinto día, se retiró la cobertura plástica, permitiendo la exposición a la luz solar directa, lo que aceleró el crecimiento foliar, siempre manteniendo una temperatura controlada de 28 °C.

Ilustración 27.

Germinación de la semilla a) densidad de siembra b) cobertura de la semilla



Nota: Fuente propia, 2023

Ilustración 28.

Germinación de la semilla a) crecimiento radicular b) crecimiento del tallo 4 día



Nota: Fuente propia, 2023

Ilustración 29.

Germinación de la semilla a) crecimiento radicular b) crecimiento del tallo 4 día



Nota: Fuente propia, 2023

8.4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CONTROL DE TEMPERATURA EN LA PRODUCCIÓN DE FVH

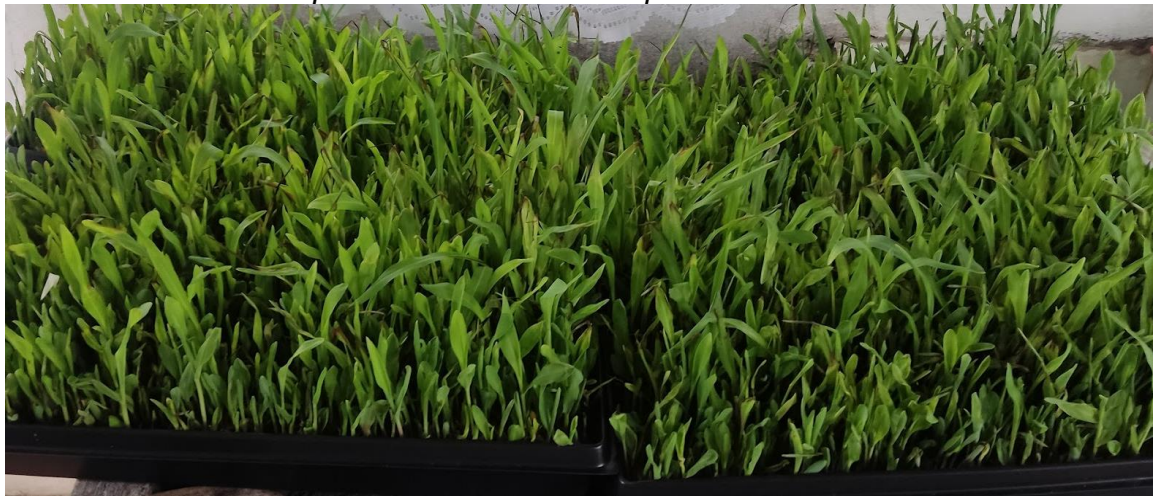
El análisis de los resultados obtenidos en el sistema de producción de forraje verde hidropónico bajo control de temperatura demuestra que, aunque el sistema logró mantener una temperatura adecuada para el crecimiento del cultivo, no fue suficiente para garantizar una producción estandarizada. El sistema de control,

basado en la tarjeta de desarrollo Arduino, permitió mantener una temperatura constante entre 28 y 29°C, lo cual es adecuado para el desarrollo del forraje verde hidropónico, la respuesta del controlador muestra como la temperatura se estabiliza a la los 53,9 segundo, adicionalmente el error de estado estable es de 1,4 % (Ilustración 4). Sin embargo, la falta de control sobre otras variables críticas, como la humedad, la luz, el riego y la calidad del agua, afectó negativamente el crecimiento del forraje, impidiendo obtener los resultados esperados en cuanto a uniformidad y biomasa.

El control de temperatura fue efectivo para estabilizar una de las condiciones más importantes del entorno de cultivo, pero no logró compensar la falta de control sobre otras variables esenciales. Factores como la calidad de las semillas, el pH y la pureza del agua, así como la gestión de la humedad relativa y la iluminación, influyeron de manera significativa en el crecimiento irregular del forraje. Sin la supervisión adecuada de estas variables, el sistema de control de temperatura, aunque preciso, no pudo proporcionar el entorno necesario para una producción estandarizada.

Ilustración 30.

Cultivo resultante después del control de temperatura.



Nota: Fuente propia, 2023

Además, el grupo que operaba sin control de temperatura experimentó fluctuaciones drásticas en el ambiente, lo que causó un crecimiento irregular y subóptimo del forraje. Estas condiciones variables se vieron agravadas por la falta de un monitoreo constante de la humedad y del riego, elementos fundamentales para mantener un entorno propicio para el desarrollo del cultivo. Aunque la temperatura se mantuvo en un rango adecuado, la falta de control sobre otras

variables resultó en resultados inconsistentes y en una producción no estandarizada.

Desde una perspectiva electrónica, el sistema de control implementado fue efectivo en el manejo de la temperatura, pero su desempeño general se vio limitado por la falta de integración de otros parámetros clave en el monitoreo y ajuste automático. La automatización del control de temperatura permitió reducir la intervención manual y mejoró la eficiencia operativa, pero un sistema más completo que incluya sensores de humedad, luz y riego es necesario para lograr una producción óptima.

En cuanto a la eficiencia, la aplicación de principios de Lean Manufacturing y Six Sigma permitió a través del control de temperatura en un cultivo llevado a cabo en invernadero que se disminuyera el desperdicio de recursos como agua y espacios, aunque las limitaciones en el control de las demás variables redujeron el impacto total de estas metodologías. El sistema mejoró la estabilidad del proceso en términos de temperatura, pero para optimizar completamente el uso de recursos y garantizar un crecimiento consistente del forraje, es esencial implementar controles adicionales.

Finalmente, los resultados muestran que, aunque el control de temperatura fue un componente clave para mejorar el crecimiento del forraje, no es suficiente para una producción estandarizada sin un control integrado de otras variables. Para lograr un sistema completamente eficiente y sostenible, es fundamental incorporar controles adicionales de humedad, luz y riego, junto con un monitoreo más riguroso de la calidad de las semillas y el agua. Solo con una supervisión y ajuste integrales del entorno de cultivo se podrá garantizar una producción estable y predecible de forraje verde hidropónico.

8.5. ANÁLISIS DE COSTOS Y BENEFICIOS

El análisis de costos y beneficios del proyecto se centra en evaluar tanto los gastos iniciales como los beneficios derivados de la implementación del sistema de control de temperatura y las mejoras en la producción de forraje verde hidropónico.

El gasto principal significa el costo de software personalizado, como la licencia de Autodesk inventor, por un total de \$ 16,608,210. Además, la fabricación de la estructura, que abarca los perfiles metálicos, soldadura y los materiales poliméricos para el recubrimiento que implican el gasto de \$ 370,000. Los equipos necesarios (actuador, sistema Arduino y sensores) cuestan \$ 121,000. Productos crudos que incluyen semillas de maíz, valorados en \$ 39,564 y \$ 200,000 por gastos inesperados, culminados en la sobrecarga primaria de \$ 17,338,774.

Los gastos anuales, principalmente del uso de maquinaria, se aproximan a \$ 50,000 cada mes, que culminan en un costo anual a \$ 600,000. Agregue los gastos de inicio

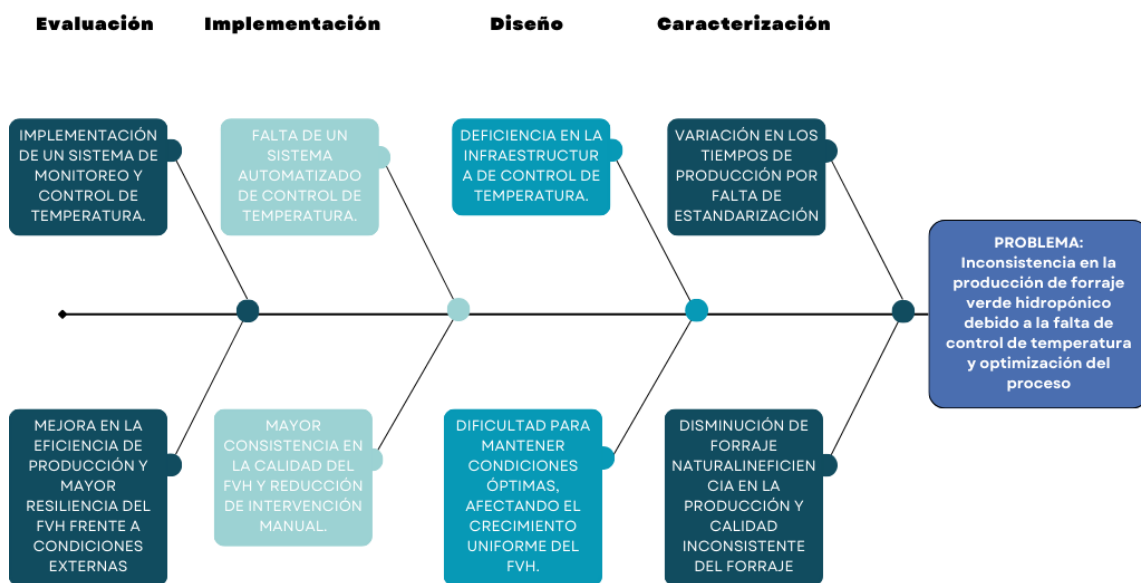
y los procedimientos administrativos en el año inaugural, culminando en un gasto total de \$ 17,938,774.

El nuevo sistema de control de temperatura aumentó el crecimiento de la planta en nuestro forraje. Del mismo modo, la incorporación de técnicas Lean ha minimizado el desperdicio de recursos, como el agua y los nutrientes, lo que significa ahorros cruciales en los gastos. La excelencia del forraje mejora igualmente, la consistencia del producto, aumentando así su valor comercial y permite el crecimiento de los precios.

Además, la aplicación de técnicas Six Sigma ha disminuido las irregularidades en la producción de FVH y ha mejorado la consistencia de este, reforzando la confiabilidad del sistema. Gracias a ello es una técnica que puede posicionarse en el mercado, ayudando con la mejora en la productividad del cultivo de FVH.

La evaluación económica pronostica que, al mejorar la eficiencia y la reducción de los costos, la iniciativa podría alcanzar la fase de equilibrio en aproximadamente un año. Reducir los desperdicios y el uso innecesario de los recursos mejora la productividad, por lo que las inversiones dan sus frutos en el tiempo establecido. En el futuro, la mejora de la calidad del cultivo y el enfoque de sostenibilidad ofrecen un valor adicional, promoviendo el crecimiento del proyecto y la aceptación más amplia del mercado.

Ilustración 31.
Espina de pescado análisis del problema



Nota: Fuente propia, 2024

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El avance de esta investigación ha mostrado que poner en marcha la línea de producción de forraje verde hidropónico (FVH) con control de temperatura ayuda a tener tiempos semejantes y control del ambiente. Sin embargo, el controlar la temperatura, aunque es un factor clave, no es el único aspecto para tener en cuenta para asegurar una producción eficiente y de alta calidad del forraje. Variables como la calidad del agua, el pH, la luz y la humedad también llegan a ser factores influyentes en el crecimiento del cultivo, por lo que se vuelve fundamental el tener un enfoque integral en donde se tenga en cuenta la interacción de todas las variables dentro del sistema automatizado.

A lo largo del desarrollo del proyecto, la implantación del Lean Manufacturing permitió optimizar los procesos al reducir desperdicios y mejorar la eficiente en el uso de recursos como agua y energía, de forma paralela, el enfoque del Six Sigma facilita el control de las condiciones climáticas a través del control de la temperatura, asegurando que el cultivo se desarrolle de manera estable. Además, al pasar de un cultivo tradicional a un cultivo hidropónico resulta en una disminución significativa en el uso de recursos, de esta forma aportando a una producción más sostenible y rentable. De esta forma se demuestra que al aplicar metodologías de mejora continua y automatización en el agro, no solo se optimiza la producción, sino que también se garantiza un sistema más estable y eficiente a largo plazo.

Sobre la caracterización del proceso de producción, se descubrió que la falta de control de la temperatura oportuno y adecuado puede conducir a variaciones en la tasa de crecimiento del FVH, lo que pone en peligro la uniformidad del cultivo. A través de los tiempos, se revela que la temperatura mínima es proporcional a la rapidez en la germinación y desarrollo de forraje, entonces, dada la cantidad de horas tomadas para la germinación natural y notando los efectos, es vital mantener condiciones ambientales ideales para aumentar la tasa de aprovechamiento del sistema.

Adicionalmente, se determinó que la distribución del espacio en el invernadero y la metodología de siembra influyen en la productividad del FVH. Un diseño adecuado del sistema de producción permite optimizar los tiempos de cosecha y reducir desperdicios, asegurando una mayor eficiencia en el uso de los recursos disponibles.

El diseño del prototipo permitió demostrar la importancia de establecer un sistema de control para regular la temperatura en el proceso de crecimiento de las plantas. La implementación de sensores y sistemas autorreguladores facilitó la generación de entornos térmicos controlados, de esta manera se mejoró la homogeneidad en

la producción de los cultivos. Sin embargo, se requiere de herramientas adicionales para verificar que el entorno sea el adecuado y optimizar su funcionamiento.

De esta manera el diseño del prototipo permitió realizar un análisis de la viabilidad a largo plazo de este sistema a nivel productivo, por ende, se concluyó que, al realizar los ajustes adecuados en la automatización del cultivo y el ahorro energético, este sistema podría llegar a implementarse en distintas condiciones climáticas, por ende, facilitando en gran manera la adaptación de estas tecnologías por parte de pequeños y medianos productores.

Al implementar el sistema de control de temperatura, se observó una mejora en la producción del FVH, ya que se mantiene un ambiente controlado que evita que el desarrollo de las plantas se vea afectado por climas extremos. Sin embargo, es fundamental realizar un monitoreo y ajuste continuo de la temperatura, ya que fluctuaciones bruscas pueden afectar significativamente la eficiencia del proceso de producción.

Por otro lado, se llegó a evidenciar que al implementar la automatización del control de temperatura no solamente se logró optimizar el crecimiento del forraje, sino que a su vez permitió una reducción en costos operativos al minimizar el uso de energía y agua, contribuyendo a un sistema de producción más sostenible para los pequeños productores.

Además, los análisis realizados confirmaron que la integración de metodologías como Lean Manufacturing y Six Sigma en la optimización del proceso contribuye a reducir variabilidades en la producción, asegurando estándares más altos de calidad. Estas estrategias, combinadas con la automatización, garantizan un sistema más confiable, eficiente y sostenible para la producción de forraje verde hidropónico a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Internacional de Energía. (2021). Renewables 2021: Analysis and Forecast to 2026. International Energy Agency.

Agraw Data. (s.f.). Representación gráfica del análisis de costos y beneficios aplicado a un proyecto agrícola [Imagen]. Recuperado en 2023.

Agricolus. (s.f.). Sensores de temperatura y humedad integrados en un sistema agrícola [Imagen]. Recuperado en 2023.

Agroshow. (s.f.). Cultivo de forraje verde hidropónico [Imagen]. En Sistema de forraje hidropónico. Recuperado en 2024.

Agrotendencia. (2024). Rumiantes alimentados con forraje verde hidropónico (FVH) [Imagen]. Adaptado de Producción de forraje verde hidropónico.

alldatasheet.com. (s. f.). 4N25 PDF. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2846/MOTOROLA/4N25.html>. Consultado el 22 de julio de 2024.

alldatasheet.com. (s. f.-a). 2N2222 PDF. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/21675/STMICROELECTRONICS/2N2222.html>. Consultado el 22 de julio de 2024.

alldatasheet.com. (s. f.-c). L7812CV PDF. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22640/STMICROELECTRONICS/L7812CV.html>. Consultado el 22 de julio de 2024.

alldatasheet.com. (s. f.-d). JQX-13F PDF. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/171896/ETC2/JQX-13F.html>. Consultado el 22 de julio de 2024.

alldatasheet.com. (s. f.-f). MAX6675 Datasheet(PDF). Maxim Integrated Products. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1150018/MAXIM/MAX6675.html>. Consultado el 22 de julio de 2024.

Atmel Corporation. (2014). ATmega640/V, 1280/V, 1281/V, 2560/V, 2561/V datasheet (Rev. Atmel-2549Q). Atmel Corporation.

AYS Proje. (2024). Sistema de invernaderos hidropónico moderno [Imagen]. Adaptado de Sistemas de Invernadero Hidropónico.

Badgujar, P. C., Patil, S. S., & Kale, S. M. (2021). Hydroponics: A sustainable approach to modern agriculture. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(5), 889-903.

Beauchemin, K. (2018). Feeding Behavior in Ruminants. In *Encyclopaedia of Animal Behavior* (pp. 572-580). Academic Press.

Bels, V., Chardonnet, P., & Gerard, J. F. (2006). *Feeding in Domestic Vertebrates: From Structure to Behavior*. CABI.

Bentley, J. P. (2005). *Principles of Measurement Systems*. Pearson Education.

Berhe, T., et al. (2019). Eficiencia de conversión alimenticia y rendimiento animal en sistemas de forraje verde hidropónico. *Journal of Animal Science and Nutrition*, 34(2), 145-160.

Bernal, L. (2021). Adaptabilidad del forraje verde hidropónico frente al cambio climático y su impacto en la conservación ambiental. *Revista de Agricultura Sostenible*, 12(3), 78-95.

Bernal, L. (2021). Forraje verde hidropónico: una alternativa sostenible frente al cambio climático. *Revista de Agricultura Sostenible*, 10(2), 45-60.

Blog de Fagro. (2024). Sello de certificación orgánica [Imagen]. Adaptado de ¿Qué es un certificado orgánico?

Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice* (5th ed.). Cambridge University Press.

BONILLA, M. A. Y., & SAYA, M. Á. Z. PROTOTIPO IOT DE MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES AMBIENTALES PARA UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE HORTALIZAS.

Boros, L., Nagy, Z., & Papp, P. (2018). Hydroponic fodder production: A sustainable approach to livestock feeding. *Journal of Agricultural Sciences*, 10(3), 45-58.

Bouabdallah, S., Noth, A., & Siegwart, R. (2004). A Comparative Study of Closed-Loop Control Strategies for an Autonomous Quadrotor. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 5, pp. 3728-3733).

Castañares, J. L. (2020). *El ABC de la Hidroponía*. EEA AMBA.

Castellanos Fúquene, A. M. (2020). *PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO LA ALTERNATIVA PARA ALIMENTACIÓN EQUINA* [Trabajo de grado]. Universidad nacional abierta y a distancia "UNAD".

Castillo, G. et al. (2019). Precision Agriculture Techniques for the Management of Irrigation and Fertilization in Greenhouse Crops. *Agricultural Water Management*, 218, 232-245

Castillo, R., et al. (2019). Optimización del cultivo en invernaderos: Control ambiental y productividad agrícola. *Agricultural Science Review*, 18(2), 75-90.

Chavarria-Torrez, A., & del Socorro Castillo-Castro, S. (2018). El forraje verde hidropónico (FVH), de maíz como alternativa alimenticia y nutricional para todos los animales de la granja. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*.

Chiara, D., Herrera, L., & Vargas, P. (2016). Cultivo hidropónico de espinaca mediante técnica NFT e invernadero para el control de variables ambientales. *Perfiles de Ingeniería*

Clavijo, B. & Giovanny, A. (2017). Estudio de factibilidad para la elaboración de un plan de negocio relacionado a la producción de forraje verde hidropónico como suplemento alimenticio de ganado lechero [Trabajo de grado]. Fundación Universidad de América.

Comisión Europea. (2007). Reglamento (CE) N° 834/2007 sobre producción y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CEE) N° 2092/91. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02007R0834-20200101&qid=1603800704376&from=ES>

Comisión Europea. (2014). Regulation (EC) No 834/2007 on organic production and labelling of organic products. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02007R0834-20180817>

Cortés, N. H. Z., & Pfalz, M. C. B. (2014). Automatización de un cultivo hidropónico para el control de variables. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*

Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

Dademuch Connection. (2021, 21 de febrero). Respuesta en el tiempo del sistema de primer orden a lazo cerrado, a la entrada escalón unitario para diferentes valores de K del controlador proporcional

Dademuch Connection. (2021, 21 de febrero). Tipos de sistemas de control [Imagen]. En Sistema de primer orden a lazo abierto y a lazo cerrado.

Datta, S., Roy, S., & De, D. (2019). Temperature Sensors: Types, Uses, and Selection Criteria. In Handbook of Research on Nanoelectronic Sensor Modeling and Applications (pp. 1-30). IGI Global.

Díaz, J., Martínez, P., & Rojas, L. (2020). Impacto del cambio climático en la producción agrícola y alternativas sostenibles para la alimentación ganadera. *Revista de Agroecología y Desarrollo Sostenible*, 12(3), 45-60.

Díaz, L., Rodríguez, F., & Martínez, P. (2020). Cambio climático y presión sobre recursos naturales: Desafíos para la agricultura tradicional y el forraje verde hidropónico. *Journal of Agricultural Sustainability*, 45(1), 78-92.

Díaz, M., Pérez, L., & Gómez, R. (2020). Adaptación agrícola al cambio climático: Estrategias para la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 18(3), 45-62.

DITTA AVILA, M. & RIVILLAS JARAMILLO, M. A. (2020). ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN INDUSTRIALIZADA Y COMERCIALIZACIÓN DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO [Trabajo de grado]. UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.

ELIZONDO J, Boschini C. Producción de forraje con maíz criollo y maíz híbrido. *Agronomía Mesoamericana*. 2002; 13(1): 13-17.

FAO. (2019). Desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles para la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2019). Impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria y la producción agrícola. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2019). Mitigación del cambio climático en la producción agropecuaria: Estrategias y prácticas sostenibles. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2019). Prácticas agrícolas sostenibles y su impacto en la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2020). El impacto del cambio climático en la producción agropecuaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2020). El impacto del cambio climático en la producción agropecuaria: Retos y soluciones. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica (IFOAM). (2012). The IFOAM Norms for Organic Production and Processing. Recuperado de https://www.ifoam.bio/sites/default/files/ifoam_norms_2012.pdf

Fernández, P., et al. (2019). Optimización de la producción de biomasa en sistemas de forraje verde hidropónico mediante fertirrigación controlada. Revista de Tecnología Agrícola, 15(2), 78-94.

Fernández, R., Gómez, J., & López, A. (2020). Hydroponic forage systems: A review of techniques and applications in animal nutrition. Agricultural Advances, 15(2), 112-126.

Food and Agriculture Organization (FAO) & World Health Organization (WHO). (1999). Organic Agriculture, Environment and Food Security. Recuperado de <http://www.fao.org/organicag/oa-faq/oa-faq1/en/>

Food and Agriculture Organization (FAO) & World Health Organization (WHO). (2019).

Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). Agricultural Development Economics: Definitions. Recuperado de <http://www.fao.org/ag/portal/ag-ekonomiks/a-z-glossary/en/>

Forraje hidropónico, una opción para la pequeña ganadería. (s. f.). BioEconomía. Recuperado 27 de octubre de 2022, de <https://www.bioeconomia.info/2019/04/30/forraje-hidroponico-una-opcion-para-la-pequena-ganaderia/#:~:text=El%20forraje%20hidropónico%20verde%20consiste,maíz%2C%20alfalfa%2C%20entre%20otras.>

Fraden, J. (2016). Introduction to Sensors. Cambridge University Press.

Franco, M., et al. (2021). Aplicación del forraje verde hidropónico en la alimentación de animales de compañía: Beneficios nutricionales y de salud. Journal of Veterinary Nutrition, 18(4), 75-89.

Freepik. (2024). Fotografía de luces LED utilizadas en un sistema hidropónico [Imagen]. Adaptado de Sistema hidropónico que utiliza luces LED para el crecimiento de plantas.

Galán, J. S. (2021, 9 febrero). Agricultura tradicional. Economipedia. Recuperado 16 de septiembre de 2022, de <https://economipedia.com/definiciones/agricultura-tradicional.html>

García, A., López, B., & Martínez, C. (2018). Impacto del control de temperatura en la producción de forraje verde hidropónico. *Revista de Agricultura Sostenible*, 25(2), 45-56

García, A., López, B., & Martínez, C. (2018). Impacto del control de temperatura en la producción de forraje verde hidropónico. *Revista de Agricultura Sostenible*, 25(2), 45-56.

García, J., et al. (2022). Capacitación y transferencia de tecnología en la agricultura sostenible: Un enfoque en sistemas hidropónicos. *Revista de Desarrollo Rural*, 12(2), 87-105.

García, L., & Castillo, R. (2022). Impacto del forraje verde hidropónico en la conservación de la biodiversidad rural. *Revista de Agroecología y Medio Ambiente*, 14(2), 75-91.

García, L., et al. (2018). Expansión global del forraje verde hidropónico: Oportunidades y desafíos en la producción ganadera. *International Journal of Hydroponics*, 15(3), 112-128.

García, L., et al. (2019). Seguridad alimentaria y reducción de agentes patógenos en cultivos hidropónicos de forraje verde. *Ciencia y Producción Agropecuaria*, 10(3), 112-128.

García, P., & Salazar, M. (2018). Impacto de la sequía en los recursos hídricos y alternativas para la agricultura sostenible. *Revista de Recursos Naturales*, 10(2), 45-60.

García, P., López, M., & Salazar, J. (2021). Estrategias para la reducción de costos en la producción ganadera mediante el uso de forraje verde hidropónico. *Revista de Economía Agropecuaria*, 15(2), 112-129.

García, R., Torres, F., & Martínez, S. (2018). Métodos cuantitativos en la optimización de procesos agrícolas: Un enfoque basado en datos. *Agricultural Data Science Review*, 15(3), 112-130.

George, M. L. (2002). *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma quality with Lean speed*. McGraw-Hill.

Gómez, C., & Torres, M. (2021). Sistemas de lazo cerrado en la agricultura: Aplicaciones y beneficios. *Journal of Precision Agriculture*, 18(2), 89-105.

Gómez, C., Herrera, A., & Rojas, F. (2020). Optimización del uso de recursos mediante sistemas de control automatizados en agricultura. *Journal of Agricultural Engineering*, 32(4), 275-290.

Gómez, D., Pérez, E., & Rojas, F. (2019). Tecnologías modernas para la optimización del cultivo hidropónico. Bogotá: Editorial Agrícola.

Gómez, L., & Rojas, M. (2021). Modelos de economía circular en la producción agropecuaria: Aplicaciones en sistemas hidropónicos. *Revista de Innovación Rural*, 8(2), 45-63.

Gómez, L., Ramírez, J., & Torres, P. (2019). Capacitación técnica y adopción de tecnologías agrícolas en zonas rurales: Un análisis de barreras y oportunidades. *Revista de Innovación Agropecuaria*, 10(2), 112-128.

Gómez, P., et al. (2020). Optimización de sistemas de control en agricultura mediante algoritmos PID. *Journal of Agricultural Automation*, 25(3), 67-82.

Gómez, R., et al. (2018). Eficiencia en el uso del agua en la producción de forraje verde hidropónico: Comparación con sistemas tradicionales de cultivo. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(1), 45-63

Gómez, R., Pérez, L., & Sánchez, M. (2021). Capacitación técnica y adopción del forraje verde hidropónico en comunidades rurales. *Revista de Innovación Agropecuaria*, 15(3), 87-102.

González, A., Pérez, L., & Ramírez, J. (2015). Impacto del forraje convencional en la salud y productividad animal. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 34(2), 123-135.

González, A., Pérez, L., & Ramírez, M. (2015). Estrategias de alimentación para el ganado: Evaluación de riesgos y beneficios. Editorial Agropecuaria.

González, R., et al. (2022). Impacto de los sistemas de control basados en sensores en la productividad agrícola intensiva. *Journal of Agricultural Technology*, 30(2), 102-119.

González, X., Martínez, R., & López, P. (2020). Estrategias de alimentación ganadera ante el cambio climático. Editorial Agropecuaria.

González-Hernández, J., et al. (2020). Influencia de fuentes de luz artificial en el crecimiento y calidad nutricional del forraje verde hidropónico. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 18(4), 125-140.

Grimes, C. A., Dickey, E. C., & Pishko, M. V. (2017). *Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications*. CRC Press.

Guidelines for the Production, Processing, Labeling and Marketing of Organically Produced Foods. Recuperado de <http://www.fao.org/3/ca5623en/ca5623en.pdf>

Hafner, T., et al. (2022). Adaptabilidad del forraje verde hidropónico en diferentes regiones y climas: Un enfoque global. *Journal of Sustainable Agriculture*, 29(2), 89-104.

Hernández, F., et al. (2022). Implementación de Internet de las Cosas en la agricultura para el monitoreo remoto de variables ambientales. *Smart Farming Technologies*, 19(2), 112-128.

Hernández, J., Ramírez, P., & Torres, S. (2019). Optimización de sistemas de control ambiental en la producción de forraje verde hidropónico. *Tecnología y Desarrollo Agrícola*, 15(2), 78-94.

Hernández, J., Ramos, M., & Sánchez, L. (2019). Desafíos y oportunidades en la producción de forraje verde hidropónico. *Revista de Agricultura Moderna*, 12(3), 78-89.

Hernández, P., et al. (2020). Producción sostenible de forraje verde hidropónico: Beneficios económicos y ambientales. *AgroCiencia y Tecnología*, 15(3), 78-92.

Hernández, P., López, J., & Castro, R. (2019). Factores ambientales y su impacto en la producción de forraje verde hidropónico. *Revista de Ciencia Agrícola*, 12(3), 45-60.

Hernández, R., & Rojas, L. (2020). Análisis de viabilidad financiera de sistemas hidropónicos en la alimentación del ganado. *Estudios de Producción Animal*, 22(4), 75-90.

Hidroponías, una técnica de cultivo aliada de la sostenibilidad. (2021, 22 abril). Iberdrola. Recuperado 16 de septiembre de 2022, de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-eshidroponia-y-ventajas>

Iberdrola. (s.f.). Tipos de sistemas de cultivo hidropónico [Imagen]. En ¿Qué es la hidroponía y cuáles son sus ventajas?. Recuperado en 2023.

Infoagro. (2022). Diagrama de un sistema de control de lazo cerrado en invernaderos, con sensores, controladores y actuadores [Imagen]. En Control de riego y fertilización.

INVERNADERO: ¿QUÉ ES? TIPOS, Y MATERIALES EMPLEADOS. (2020, 17 enero). La web sobre flores más completa del mundo. Recuperado 16 de septiembre de 2022, de https://nuestraflora.com/c-complementos/invernadero/#Que_es_un_Invernadero

IPCC. (2019). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Khan, A., Rojas, F., & Pérez, M. (2018). Recent Trends in Smart Farming Technologies for Sustainable Agriculture. *Sustainable Agriculture Reviews*, 30, 139-162.

Kuo, B. C., & Golnaraghi, F. (2002). *Automatic Control Systems*. John Wiley & Sons.
La Finca de Hoy. (2022, 24 octubre). Maíz en alimentación de cerdos - La Finca de Hoy [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=YkjKz1z4BGU>

Li, X., et al. (2017). Optimización del crecimiento de forraje verde hidropónico mediante el uso de iluminación LED de alta eficiencia. *Journal of Hydroponic Research*, 22(4), 178-193.

Li, X., et al. (2021). Efecto del forraje verde hidropónico en la calidad de la carne de cerdo y la eficiencia alimenticia. *Journal of Animal Nutrition*, 25(2), 67-81.

Liu, J., et al. (2019). Mejoramiento genético de cultivos forrajeros para sistemas hidropónicos: Resistencia y eficiencia nutricional. *Journal of Plant Breeding*, 27(1), 55-72.

Live Plant Biotech. (s.f.). Invernadero moderno con cultivos protegidos y estructuras avanzadas [Imagen]. Recuperado en 2023.

López Elías, J. (2018). La producción hidropónica de cultivos. *Idesia (Arica)*, ahead, 0-0. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292018005000801>

López, J., & Ramírez, C. (2022). Comparación nutricional entre el forraje verde hidropónico y los cultivos tradicionales en la alimentación ganadera. *Revista de Nutrición Animal*, 18(2), 55-72.

- López, M., & Ramírez, F. (2022). Impacto del forraje verde hidropónico en la seguridad alimentaria y el desarrollo económico rural. *AgroInnovación*, 9(1), 34-50.
- López, M., et al. (2021). Optimización del ambiente agrícola mediante el monitoreo de variables clave. *Precision Farming Journal*, 18(4), 45-60.
- López, M., Rodríguez, J., & Hernández, P. (2020). Evaluación de tecnologías agrícolas mediante análisis cuantitativo: Aplicaciones en la producción de forraje. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(1), 78-95.
- López, M., Sánchez, D., & Torres, P. (2021). Automatización y control en la agricultura moderna. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 45(2), 112-129.
- López, R. et al. (2021). Control Strategies for Temperature Management in Greenhouse Agriculture. *Journal of Agricultural Engineering*, 25(3), 45-56.
- López, R., Martínez, J., & Sánchez, P. (2021). Factores ambientales clave en la producción de forraje verde hidropónico: Regulación y control en sistemas agrícolas sostenibles. *Revista de Agricultura Tecnológica*, 18(1), 45-60.
- López, R., Torres, G., & Díaz, J. (2021). Control Strategies for Temperature Management in Greenhouse Agriculture. *Journal of Agricultural Engineering*, 25(3), 45-56.
- López, R., Torres, G., & Díaz, J. (2021). Estrategias para mejorar la calidad del forraje verde hidropónico. *Journal of Hydroponic Agriculture*, 15(1), 112-125.
- López-Aguilar, Raúl, Murillo-Amador, Bernardo, & Rodríguez-Quezada, Guadalupe. (2009). El forraje verde hidropónico (FVH): Una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia*, 34(2), 121-126.
- Maldonado-Torres, R., Álvarez-Sánchez, M. E., Cristobal-Acevedo, D. & Ríos-Sánchez, E. (2013). MINERAL NUTRITION OF HYDROPONIC GREEN FORAGE. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XIX (2), 211. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.10.053>
- Martínez, A., Rodríguez, L., & Pérez, J. (2020). Eficiencia del forraje verde hidropónico en el uso del agua y su impacto en la producción ganadera. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(3), 78-94.
- Martínez, F., Díaz, A., & Rojas, P. (2017). Impacto del cambio climático en la agricultura de la Sabana de Bogotá. *Revista de Estudios Ambientales*, 32(4), 67-79.

Martínez, J., et al. (2017). Agricultura orgánica y su impacto en la sostenibilidad ambiental y la salud humana. *Journal of Sustainable Agriculture*, 25(3), 45-60.

Martínez, J., et al. (2017). Uso de sensores en el control de humedad y temperatura en cultivos intensivos. *Agricultural Engineering Review*, 22(1), 78-91.

Martínez, J., Pérez, L., & Gómez, R. (2017). Fundamentos de sistemas de control en ingeniería. Editorial Alfaomega.

Martínez, L. et al. (2017). *Organic Agriculture: Principles and Practices*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Martínez, L., Gómez, P., & Ramírez, J. (2021). Producción de forraje en sistemas hidropónicos: Un enfoque sostenible. *Revista de Innovación Agrícola*, 15(2), 78-95.

Martínez, P., Ramírez, J., & López, S. (2020). Corredores biológicos y su relación con la producción agrícola sostenible en sistemas hidropónicos. *Estudios Ambientales y Desarrollo Rural*, 18(3), 102-118.

Martínez, R., Fernández, C., & López, G. (2017). Rentabilidad y viabilidad de la producción de forraje verde hidropónico: Un enfoque económico y técnico. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 14(1), 55-72.

Martínez, R., Pérez, L., & Gómez, J. (2019). Principios de automatización y control en la agricultura. *Revista de Tecnología Agrícola*, 27(3), 150-165.

Martínez-García, J., et al. (2022). Producción de alimentos orgánicos para animales mediante forraje verde hidropónico: Beneficios y certificación. *Organic Farming Research*, 15(3), 112-127.

Mejía-Castillo, H. J. & Orellana Núñez, F. S. (2019). Forraje verde hidropónico: una alternativa de producción ante el cambio climático. *Rev. iberoam. bioecon. cambio clim.*, 5(9), 1103-1120. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v5i9.7947>

Mogollón Cuy, N. E. (2021). Comparación de las Dietas de Forraje Verde Hidropónico (FVH) Maíz Amarillo y Concentrado Comercial, en la Alimentación de 10 Ovinos Criollos en la Finca Sisgua Municipio de Cácuta Norte de Santander [Trabajo de grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD.

MORALES-Rodríguez HJ, Gómez-Danés Alejandro A, Juárez López P, Loya Olgún L, Ley de Coss A. Forraje verde hidropónico de maíz amarillo (zea maíz I.) con diferente concentración de solución nutritiva. *Abanico Veterinario*. 2012; 2 (3): 20-28.

Moreno, C., & Castillo, R. (2021). Innovación y desarrollo rural: El papel de la tecnología en la transformación agrícola. *Ciencia y Desarrollo*, 18(4), 112-130.

Moreno, J., & Castillo, P. (2021). Impacto ambiental de la agricultura hidropónica en la reducción de contaminantes agrícolas. *Revista de Agroecología y Medio Ambiente*, 18(3), 45-60.

Moreno, J., & Castillo, P. (2021). Impacto del forraje verde hidropónico en la resiliencia social y económica de comunidades rurales. *Revista de Agroecología y Desarrollo Rural*, 19(2), 55-70.

Murcia Vélez, J. D. & Chacón Segura, L. F. (2018). DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CULTIVO HIDROPÓNICO PARA FORRAJE VERDE. [Trabajo de grado]. UNIVERSIDAD DE LA SALLE.

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall.

PARRA, D. B., DOMINGUEZ, F. M., CEBALLOS, A., & PINZÓN, M. A. R. (2020). EVALUACIÓN DE VARIABLES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CONDICIONES ÓPTIMAS EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO EN EL INVERNADERO DEL ITSPE. *Innovación en Biotecnología II*, 11.

Pérez, J., Ramírez, C., & Fernández, L. (2020). Sensores de temperatura y su aplicación en la agricultura moderna. *Journal of Agricultural Technology*, 15(3), 210-225.

Pérez, J., Ramírez, M., & Torres, L. (2019). Impacto del estrés térmico en la producción bovina. *Revista de Producción Animal*, 34(2), 45-60.

Pérez, L., et al. (2020). Gestión automatizada de microclimas en invernaderos mediante sensores de temperatura. *Smart Agriculture Advances*, 14(3), 34-50.

Pérez, L., et al. (2022). Forraje verde hidropónico como estrategia de generación de empleo en comunidades rurales. *Journal of Agricultural Economics*, 15(3), 56-75.

Pérez, L., Gómez, A., & Ramírez, C. (2020). Estrategias de riego y manejo de soluciones nutritivas en sistemas hidropónicos: Un enfoque hacia la sostenibilidad agrícola. *Revista de Innovación Agrícola*, 25(2), 78-92.

Pérez, L., Gómez, R., & Martínez, S. (2021). Producción sostenible de forraje en regiones semiáridas: Retos y oportunidades. *Revista de Agroecología y Medio Ambiente*, 12(1), 34-50.

Pérez, L., Gómez, R., & Ramírez, S. (2021). Producción sostenible de forraje verde hidropónico y su efecto en la seguridad alimentaria ganadera. *Estudios de Agricultura y Cambio Climático*, 12(4), 98-115.

Pérez, M. et al. (2020). Sensor Technologies for Environmental Monitoring in Agriculture. *Biosystems Engineering*, 198, 112-125.

Pérez, M., Gutiérrez, L., & Torres, R. (2021). Impacto del cambio climático en la producción ganadera y la eficiencia del forraje hidropónico en zonas rurales. *Ciencia Agropecuaria*, 25(1), 33-50.

Pérez, M., Rodríguez, C., & Sánchez, F. (2018). Efficiency of hydroponic forage in water use and year-round production. *Journal of Sustainable Agriculture*, 12(4), 78-93.

Pérez, M., Sánchez, N., & Gómez, R. (2020). Control de variables en el cultivo de forraje verde hidropónico. Bogotá: Editorial Científica.

Pérez, M., Sánchez, N., & Gómez, R. (2020). Sensor Technologies for Environmental Monitoring in Agriculture. *Biosystems Engineering*, 198, 112-125.

Pizarro, E. P. J. (2014, 25 octubre). Qué es el forraje verde hidropónico y cómo producirlo. *Agriculturers.com | Red de Especialistas en Agricultura*. <https://agriculturers.com/origenes-y-uso-del-forraje-verde-hidroponico/>
Pretty, J. (1995). Defining Sustainable Agriculture: A Historical Analysis. *Agricultural Systems*, 44(2), 217-238.

Ramírez, C., & Hernández, P. (2021). Estrategias para la optimización de la producción ganadera mediante el uso de forraje verde hidropónico. *Estudios en Producción Animal*, 20(3), 88-104.

Ramírez, J., & López, M. (2022). Forraje verde hidropónico como alternativa para la ganadería en regiones de escasez hídrica. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(4), 89-102.

Ramírez, J., & López, S. (2021). Estrategias para la reducción de emisiones en la producción agrícola: El papel del forraje verde hidropónico. *Revista de Sostenibilidad Agropecuaria*, 12(1), 55-72.

Ramos, L., Pérez, M., & Gutiérrez, C. (2020). Impacto de la temperatura en la producción de forraje verde hidropónico: Factores limitantes y estrategias de control. *Revista de Tecnología Agrícola*, 15(2), 78-92.

Ramos, L., Rojas, A., & García, D. (2020). Producción sostenible de forraje verde hidropónico. *Revista de Agricultura Sostenible*, 27(1), 34-47.

Reddy, T. Y., & Reddy, K. R. (2019). *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*. CRC Press.

ResearchGate. (s.f.). Rumiantes consumiendo forraje verde hidropónico en un entorno controlado [Imagen]. Recuperado en 2023.

Resh, H. M. (2018). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower (7th ed.)*. CRC Press.

Ribeiro, J., et al. (2021). Efectos del forraje verde hidropónico en la alimentación de aves de corral: Crecimiento y calidad de la carne. *Poultry Science Review*, 32(1), 55-72.

Rodríguez Moncada, L. M. Control de las soluciones y variables ambientales de un cultivo hidropónico de lechuga mediante un sistema embebido conectado a Internet. Rodríguez, A., & González, M. (2019). Estrategias para la conservación de ecosistemas en zonas agrícolas en expansión. *Estudios Ambientales y Desarrollo Rural*, 10(1), 78-95.

Rodríguez, P., et al. (2013). Historia y evolución del forraje verde hidropónico: Desde sus inicios hasta la actualidad. *Agricultural History Review*, 19(1), 45-62.

Rojas, H., Fernández, C., & Torres, M. (2018). *Hidroponía aplicada a la alimentación animal: Beneficios y desafíos*. Editorial AgroSostenible.

Rojas, J., Martínez, S., & López, M. (2021). Implementación de invernaderos para la producción de forraje verde hidropónico. *Journal of Sustainable Agriculture*, 18(2), 56-68.

Rojas, S., et al. (2021). Aplicaciones de sensores inalámbricos en el monitoreo remoto de cultivos agrícolas. *Remote Sensing in Agriculture*, 27(2), 90-110.

Romero, C., et al. (2020). Uso del forraje verde hidropónico en la alimentación de rumiantes: Impacto en la producción de leche y carne. *Revista de Producción Animal*, 15(3), 45-60.

Rui, H., et al. (2021). Impacto ambiental del forraje verde hidropónico en comparación con cultivos convencionales. *Environmental Sustainability Journal*, 27(3), 102-118.

- Sánchez, J., Rodríguez, P., & López, R. (2019). Optimización de la producción de forraje verde hidropónico en sistemas rurales. *Revista de Producción Agropecuaria*, 35(2), 45-60.
- Sánchez, L., González, M., & Pérez, S. (2019). Efectos del forraje convencional y alternativas hidropónicas en la alimentación animal. *Journal of Animal Nutrition*, 45(1), 45-58.
- Sánchez, M., Urdiales, C., & Martínez, A. (2018). Automation in Agriculture: Technology Adoption, Mechanization, and Precision Farming. In *Handbook of Research on Technological Developments for Cultural Heritage and eTourism Applications* (pp. 132-154). IGI Global.
- Sánchez, P., Ramírez, D., & Herrera, F. (2020). Comparación entre sistemas de lazo abierto y lazo cerrado en ambientes agrícolas controlados. *Agricultural Control Systems Review*, 12(4), 205-220.
- Sánchez, V., Gómez, J., & Hernández, A. (2018). Impacto económico del cultivo de forraje verde hidropónico en la industria ganadera. *Revista de Economía Agrícola*, 22(3), 89-101.
- Santos, F., et al. (2019). Uso de forraje verde hidropónico en la alimentación de peces de cultivo: Evaluación en tilapias y truchas. *Aquaculture Research Journal*, 22(3), 88-102.
- Santos, M., et al. (2015). Avances recientes en la producción de forraje verde hidropónico: Innovaciones y sostenibilidad. *Sustainable Agriculture Journal*, 10(3), 67-83.
- Savvas, D., Passam, H. C., & Olympios, C. (2013). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Springer.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2010). *Process Control: A Practical Approach*. John Wiley & Sons.
- Sejrsen, K., Hvelplund, T., & Nielsen, M. O. (2006). *Ruminant Physiology: Digestion, Metabolism and Impact of Nutrition on Gene Expression, Immunology and Stress*. Wageningen Academic Publishers.
- Sharma, N., Chen, L., & Zhang, G. (2018). Sensors: A Comprehensive Survey. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9(6), 1739-1778.
- Silva, C., Pérez, R., & Torres, L. (2019). Reducción de la huella de carbono en sistemas de producción agrícola alternativos. *Revista Internacional de Cambio Climático*, 7(2), 112-130.

Silva, D., González, H., & Ramírez, F. (2019). Transferencia tecnológica y su rol en la implementación de sistemas de producción sostenible. *Estudios sobre Desarrollo Agrícola*, 10(1), 45-63.

Silva, R., et al. (2021). Automatización y digitalización en la agricultura: Estrategias para la optimización de cultivos hidropónicos. *Journal of Smart Agriculture*, 10(1), 102-120.

Smith, A., Johnson, K., & Rodríguez, D. (2021). Efectos del cambio climático en la calidad de las pasturas. *Journal of Agricultural Science*, 78(3), 112-130.

Smith, B., & Struik, P. (2014). Desarrollo tecnológico del forraje hidropónico en la agricultura moderna. *Plant Growth and Technology*, 18(2), 134-150.

Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2005). *Principles and Practice of Automatic Process Control*. John Wiley & Sons.

Smith, J., et al. (2020). Tecnologías emergentes en la agricultura: Agricultura de precisión y smart farming. *Journal of Agricultural Innovation*, 25(3), 112-130.

Smith, P. et al. (2020). Smart Farming Technologies for Sustainable Agricultural Development. *Sustainable Agriculture Reviews*, 41, 75-102.

Smith, P., García, A., & Martínez, C. (2020). Smart Farming Technologies for Sustainable Agricultural Development. *Sustainable Agriculture Reviews*, 41, 75-102. StackPath. (s. f.). Recuperado 16 de septiembre de 2022, de <https://bloglatam.jacto.com/agricultura-de-precision/>

Talibi, A. L., Ahssen, T., & El Yassami, A. (2017). Process Control: A Review. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 15313-15318.

Tecnología, C. E. E. D. E. Y. (2022, 22 abril). Smart farming. Conoce qué es y sus características. VIU. Recuperado 16 de septiembre de 2022, de <https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/smart-farming-conoce-que-es-y-sus-caracteristicas>

Torres, E. et al. (2019). Estándares de calidad en el forraje verde hidropónico. Bogotá: Editorial Agropecuaria.

Torres, E., Martínez, L., & Pérez, D. (2019). Estándares de calidad en el forraje verde hidropónico. Bogotá: Editorial Agropecuaria.

Torres, L., et al. (2019). Evaluación nutricional del forraje verde hidropónico en la alimentación de rumiantes. *Animal Nutrition Research*, 12(1), 89-102.

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2018). Smart Farming Technologies for Sustainable Agricultural Development. Recuperado de https://unece.org/DAM/trade/agr/meetings/2018/ECE_CEP_2018_4Rev1_e.pdf
United States Department of Agriculture (USDA). (2018). Organic 101: What the USDA Organic Label Means. Recuperado de <https://www.usda.gov/media/blog/2012/03/22/organic-101-what-usda-organic-label-means>

Van Soest, P., et al. (2020). Efectos del forraje verde hidropónico en la productividad y conversión alimenticia en sistemas ganaderos. *Livestock Science Journal*, 30(1), 112-130.

Vignes, J., Briaud, J. L., Lassue, S., & Mayoux, C. (2019). Temperature Measurement. In *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance* (pp. 33-68). CRC Press.

Villalobos, V. V. J. (2018, 23 marzo). Efecto de la intensidad lumínica de diodos emisores de luz y del fotoperiodo en la producción de forraje verde hidropónico de Maíz (zea mays) y utilización de agua. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/10088>

Wang, H., et al. (2018). Automatización y optimización de recursos en el cultivo de forraje verde hidropónico. *Agricultural Technology and Innovation*, 21(2), 98-115.

Wang, L., et al. (2022). Viabilidad económica del forraje verde hidropónico a gran escala: Costos, beneficios y perspectivas futuras. *Agricultural Economics Journal*, 34(1), 56-71.

Webber, H., Walsh, M., & Layden, M. (2018). Automation: The Future of Weed Control in Cropping Systems. In *Automation in Agriculture* (pp. 97-114). Elsevier.

Wikifarmer. (s.f.). Sistema de agricultura de precisión con sensores de suelo y sistemas de gestión digital [Imagen]. Recuperado en 2024.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation*. Free Press.

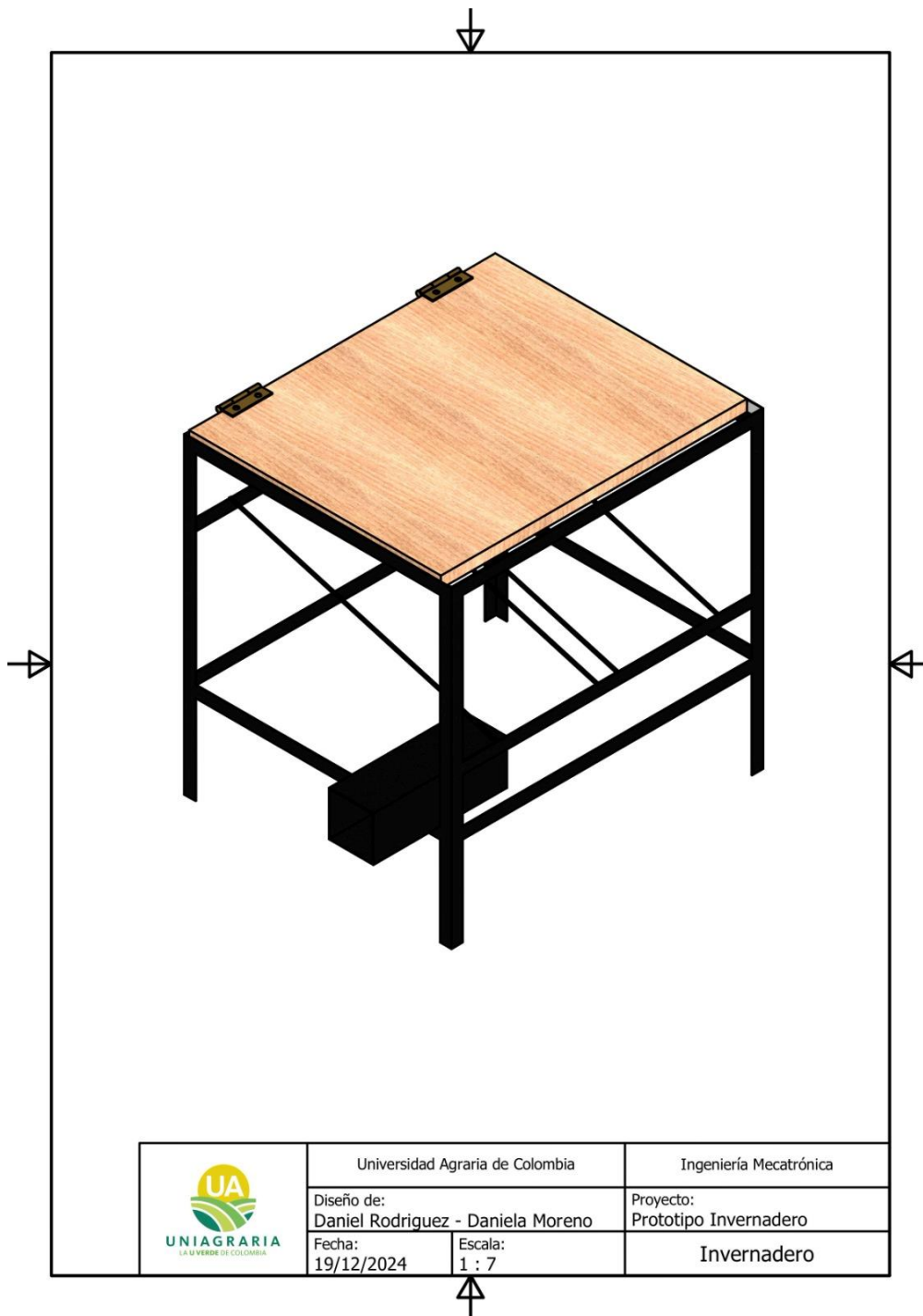
Yang, X., et al. (2019). Aplicaciones del forraje verde hidropónico en diferentes especies ganaderas: Un análisis comparativo. *Livestock Research and Development*, 18(4), 200-215.

Yate-Bonilla, M. A., & Zambrano-Saya, M. Á. (2022). Prototipo lot de monitoreo y control de variables ambientales para un cultivo hidropónico de hortalizas.

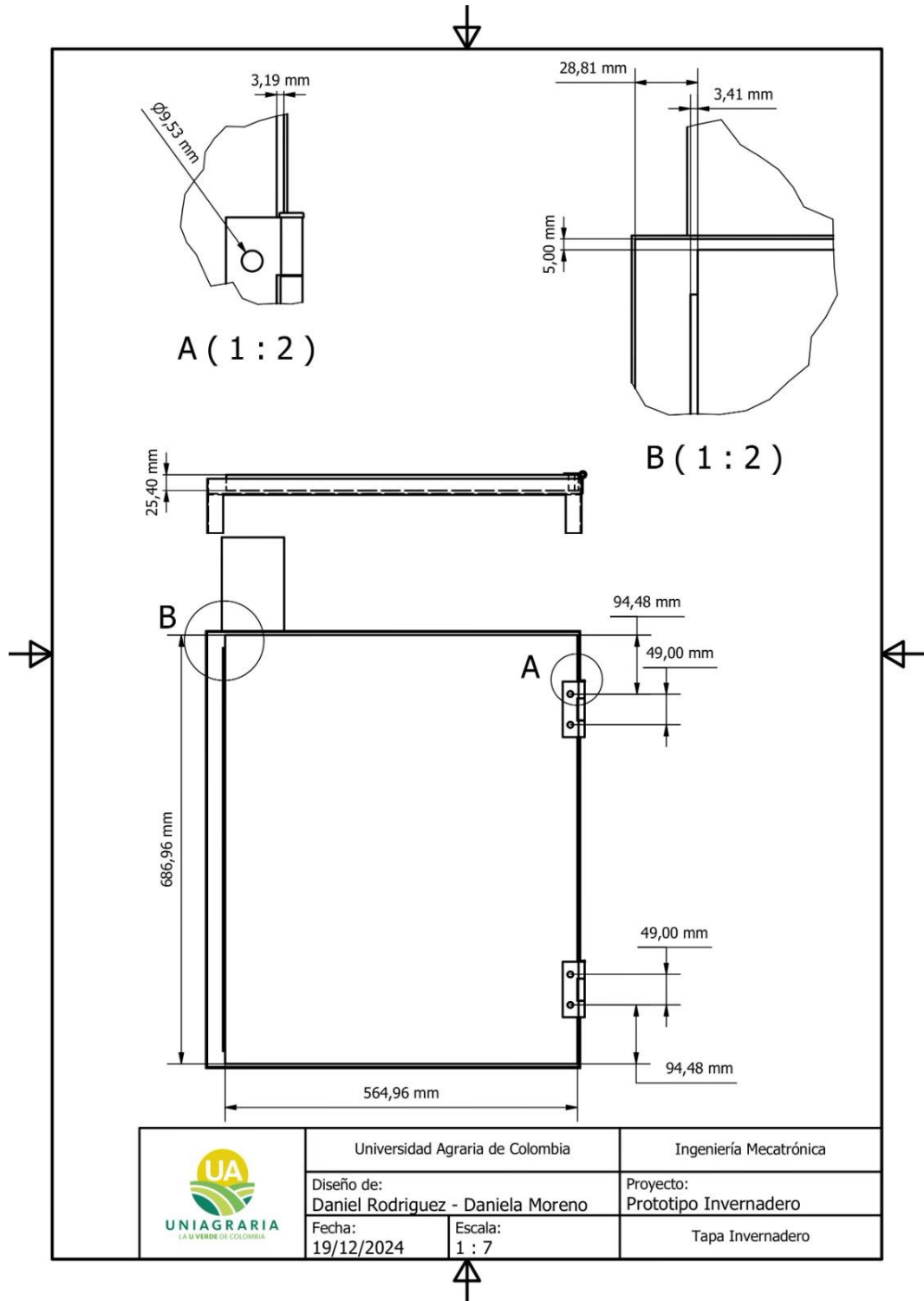
Zagal Tranquilino, M., Martínez González, S., Salgado Moreno, S., Escalera Valente, F., Peña Parra, B. & Carrillo Díaz, F. (2016). Producción de forraje verde hidropónico de maíz con riego de agua cada 24 horas [Trabajo de grado]. Universidad Autónoma de Nayarit.

ANEXOS

1. Estructura invernadero en software



2. Prototipo de invernadero



3. Montaje de invernadero



4. Pseudocódigo del Script de Arduino

Inicialización:

Importar las bibliotecas necesarias (MAX6675).

Definir los pines:

pinRelevador = 10 (para controlar el relevador que activa el actuador térmico).

Pines del MAX6675 (pines de SPI).

Declarar variables:

ultimaLectura = 0 (almacena el tiempo de la última lectura de temperatura).

intervaloLectura = 5000 ms (tiempo entre lecturas, 5 segundos).

Configurar el pin del relevador como salida.

Inicializar la comunicación serial (para monitoreo de la temperatura).

Función setup():

Configurar los pines de entrada/salida.

Inicializar el sensor MAX6675.

Bucle loop():

Obtener el tiempo actual (tiempoActual = millis()).

Comprobar si han pasado 5 segundos desde la última lectura:

Si tiempoActual - ultimaLectura >= intervaloLectura:

Leer la temperatura del sensor MAX6675.

Actualizar ultimaLectura con el tiempo actual.

Control on-off:

Si la temperatura es menor a 28 °C:

Encender el relevador (digitalWrite(pinRelevador, HIGH)).

Si la temperatura es mayor o igual a 28 °C:

Apagar el relevador (digitalWrite(pinRelevador, LOW)).

Fin del bucle: