

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica



“Desarrollo de un ambiente controlado para la producción de hortalizas para la Empresa Indigo Drones”.

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Giovanni Brenes Pereira

Cartago, noviembre del 2016

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

Defensa de Proyecto de Graduación

Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica

Grado Académico de Licenciatura

Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Desarrollo de un ambiente controlado para la producción de hortalizas, realizado por Giovanni Brenes Pereira, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Sergio Arriola Valverde

Profesor lector



Ing. Hayden Phillips Brenes

Profesor lector



Ing. Faustino Montes de Oca

Profesor asesor

Cartago, Costa Rica

Noviembre del 2016

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Costa Rica

Giovanni Brenes P.

Giovanni Brenes Pereira

Ced: 304200126

Resumen

En algunos lugares de nuestro país existen ambientes hostiles en los que por consecuencias climatológicas se complica la producción de hortalizas. También cada día hay más personas que están viviendo en zonas fuertemente pobladas, lo que produce una demanda creciente de alimentos cultivados localmente y producidos de forma sostenible, e incluso los habitantes de las ciudades quieren que sus alimentos sean frescos y llenos de nutrientes, no pre-empaquetados y enviados desde miles de kilómetros de distancia.

Nuestro clima también sigue cambiando constantemente por la excesiva contaminación que vivimos hoy en día, las condiciones meteorológicas extremas son cada vez más comunes, la tierra y el agua son cada vez más escasos, la producción de alimentos a gran escala y la distribución han tenido un impacto significativo en el ecosistema de la tierra.

Es por esta razón que la empresa Indigo Drones ha iniciado labores en búsqueda de alternativas para la producción de este tipo de cultivos, mediante investigaciones y diferentes actividades que le permitan encontrar la mejor solución al problema que vivimos hoy en día.

Por lo que en el presente proyecto se plantea desarrollar un prototipo de ambiente controlado que sea capaz de controlar variables físicas necesarias para el crecimiento de las plantas como lo son la luminosidad, la temperatura, el dióxido de carbono y la humedad.

Palabras claves: ambiente controlado, arduino, dióxido de carbono, hortalizas, humedad, luminosidad, sistema, temperatura.

Abstract

In some places of our country there are hostile environments in which, due to climatic consequences, the production of vegetables is complicated. There are also more people living in heavily populated areas every day, resulting in a growing demand for locally grown and sustainably produced food, and even city dwellers want their food to be fresh and full of nutrients, packaged and shipped from thousands of miles away.

Our climate is also constantly changing due to the excessive pollution we live in today, extreme weather conditions are becoming more common, land and water are increasingly scarce, large scale food production and distribution have had a significant impact on the earth's ecosystem.

It is for this reason that the company Indigo Drones has begun work in search of alternatives for the production of this type of crops, through research and different activities that allow you to find the best solution to the problem that we live today.

Therefore in the present project it is proposed to develop a prototype of controlled environment that is able to control physical variables necessary for the growth of plants such as luminosity, temperature, carbon dioxide and humidity.

Keywords: controlled environment, arduino, carbon dioxide, crops, humidity, brightness, system, temperature.

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a Dios y la Virgen por brindarme la oportunidad de poder estudiar y crecer como persona.

A mi madre por el apoyo incondicional, por ayudarme en todo momento de mi vida y por todas las palabras de aliento en los momentos más difíciles, gracias por enseñarme que con trabajo, dedicación y amor se pueden alcanzar grandes cosas.

A mi familia por apoyarme en cada decisión que tomé, por todo ese amor brindado que me ha motivado a nunca bajar la cabeza y a siempre buscar más.

A Indigo Drones, especialmente al Ingeniero Sergio Ballester por confiar en mí persona durante todo este tiempo, por brindarme la ayuda necesaria en todo momento para el desarrollo de este presente proyecto.

Al Ingeniero Sergio Arriola por la ayuda brindada para este proyecto, quien ha tenido un seguimiento de manera indirecta del trabajo realizado.

Gracias a todas esas personas que fueron parte de este proceso, siempre las voy a recordar con mucho cariño.

Índice General

Contenido

Resumen.....	iv
Agradecimientos	vi
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Objetivo y estructura del documento	4
Capítulo 2: Marco teórico	6
2.1 Requerimientos de las plantas	6
2.1.1 El proceso de germinación	7
➤ Fase I: imbibición.....	8
➤ Fase II: activación metabólica o germinación	9
➤ Fase III: crecimiento de la radícula.....	10
➤ Factores externos para la germinación de la semilla	11
2.1.2 Etapas iniciales de desarrollo de la plántula	13
2.1.3 Necesidades básicas de las plantas	16
➤ Calidad de Luz.....	17
➤ Intensidad de Luz	18
➤ Duración de la Luz (fotoperiodo)	20
➤ Concentración de dióxido de carbono	20
➤ Temperatura.....	20
➤ Humedad.....	21
➤ Disponibilidad de agua.	21
2.2 Características de la lechuga	22
2.3 Sistema de ambiente controlado	24
2.4 Plataforma de procesamiento de datos Arduino	25
2.5 Protocolos de comunicación	26
2.6 Medición de variables físicas.....	30
2.6.1 Luminosidad	30
2.6.2 Temperatura.....	30
2.6.3 Humedad	30
2.6.4 Dióxido de carbono	31
Capítulo 3: Diseño y desarrollo del sistema de ambiente controlado.	32
3.1 Análisis y selección final de la solución.	33

3.1.1 Solución 1: Adquisición de un sistema comercial.	33
3.1.2 Solución 2: Diseñar y crear los dispositivos de medición.....	33
3.1.3 Solución 3: Crear el sistema comprando hardware y software libre con componentes disponibles comercialmente.	33
3.1.4 Comparación y selección de la solución.....	34
3.2 Desarrollo del concepto de diseño.....	36
3.3 Descripción de los módulos.	36
3.3.1 Módulo de comunicación por internet.	37
3.3.2 Módulo de reloj en tiempo real.	37
3.3.3 Módulo de sensores.	39
3.3.4 Módulo de almacenamiento de información.	41
3.3.5 Módulo de interfaz de usuario.....	42
3.3.6 Unidad central de procesamiento.....	43
3.4 Descripción del modelo de software.	44
3.5 Descripción del algoritmo de control del sistema de ambiente controlado.....	45
Capítulo 4: Validación y análisis	55
4.1 Resultados para el módulo de sensores.....	55
4.1.1 Sensor de temperatura	55
4.1.2 Sensor de humedad	56
4.1.3 Sensor de luminosidad	58
4.1.4 Sensor de dióxido de carbono.....	59
4.2 Resultados para el módulo de almacenamiento de información.	61
4.3 Resultados para el módulo de interfaz de usuario.	62
4.4 Resultados para el módulo de comunicación por internet.....	64
4.5 Resultados para el módulo reloj en tiempo real.....	66
4.6 Resultados del crecimiento de la planta.	69
4.7 Resultados del consumo de potencia del sistema.	71
Capítulo 5: Conclusiones	72
5.1 Recomendaciones	75
Bibliografía	77
Apéndices	80
A.1 Selección de hardware.....	80
A.2 Diagramas de interconexión del sistema de ambiente controlado.....	88

A.3 Fórmulas utilizadas en el informe..... 94

Índice de figuras

Figura 1.1 Calidad y rendimiento del cultivo en ambientes protegidos, adaptado de [2].	3
Figura 2.1 Curva de absorción de agua de las semillas y las actividades metabólicas asociadas con las diferentes fases, tomado de [4].	7
Figura 2.2 Etapa inicial de la germinación que comprende la imbibición y la aparición de la radícula, tomado de [5].	10
Figura 2.3 Etapas de crecimiento de una planta, modificado de [6].	14
Figura 2.4 Espectro electromagnético de la energía radiante, tomado de [9].	17
Figura 2.5 Diagrama de interconexión para el protocolo I2C.	27
Figura 3.1 Diseño modular para el sistema de ambiente controlado.	36
Figura 3.2 Modelo en cascada, adaptado de [14].	45
Figura 3.3 Diagrama de flujo para el algoritmo de control del sistema de ambiente controlado.	46
Figura 3.4 Diagrama de flujo para el algoritmo de inicialización de hardware.	47
Figura 3.5 Diagrama de flujo para el algoritmo de adquisición de datos.	48
Figura 3.6 Diagrama de flujo para el algoritmo para el almacenamiento de datos.	49
Figura 3.7 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de la temperatura.	50
Figura 3.8 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de la humedad.	51
Figura 3.9 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de la luminosidad.	52
Figura 3.10 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de dióxido de carbono.	52
Figura 3.11 Diagrama de flujo para el algoritmo de envío de datos vía WiFi.	54
Figura 4.1 Condiciones meteorológicas para la estación de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica, dato temperatura, tomado de [28].	55
Figura 4.2 Condiciones meteorológicas para la estación de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica, dato humedad, tomado de [28].	57
Figura 4.3 Formato txt para el almacenamiento de la información.	61
Figura 4.4 Visualización del menú en el módulo de interfaz de usuario.	62
Figura 4.5 Menú del sistema.	63
Figura 4.6 Variables físicas dentro del sistema de ambiente controlado.	63
Figura 4.7 Información básica acerca de la lechuga.	64
Figura 4.8 Visualización en la plataforma Thingspeak.	65
Figura 4.9 Visualización en la aplicación para móviles de la plataforma Thingspeak.	65
Figura 4.10 Visualización en el osciloscopio de la señal serial data (SDA) para el módulo del RTC.	67

Figura 4.11	Visualización en el osciloscopio de la señal serial clock (SCL) para el módulo del RTC....	67
Figura 4.12	Visualización de la hora (Time) y la fecha (Date) del módulo RTC.....	68
Figura 4.13	Primera prueba con una bandeja de 200 unidades de lechuga.	69
Figura 4.14	Crecimiento de las lechugas después de 3 días de haberse plantado.....	70
Figura 4.15	Crecimiento de las lechugas después de 8 días de haberse plantado.....	70
Figura A.1	Resultado de la caja en la cual se implementó el prototipo.	87
Figura A.2.1	Diagrama modular de la conexión del sensor de temperatura y humedad DHT22 con el arduino.	88
Figura A.2.3	Diagrama modular de la conexión del sensor de dióxido de carbono con el arduino....	89
Figura A.2.4	Diagrama de la distribución de pines del módulo ESP8266, tomado de [24].....	90
Figura A.2.5	Diagrama modular de la conexión del módulo WIFI ESP8266 con el arduino.....	91
Figura A.2.6	Diagrama modular de la conexión de la luz Neopixel con el arduino.....	91
Figura A.2.7	Diagrama modular de la conexión de la luz Neopixel Led por Led, tomado de [22].	92
Figura A.2.8	Diagrama modular de la conexión del ventilador con el arduino.....	92
Figura A.2.9	Diagrama de la conexión del shield data logger con el arduino, tomado de [25]	93
Figura A.2.10	Diagrama de la conexión de la bomba de agua.....	93

Índice de tablas

Tabla 2.1 Efectos diferentes para una planta según la intensidad de luz, tomados de [8].	19
Tabla 2.2 Requerimientos agroecológicos de la lechuga, tomada de [6]......	24
Tabla 2.3 Lista de comandos AT, tomados de [13].....	28
Tabla 3.1 Requerimientos y restricciones mínimas.....	32
Tabla 3.2 Comparativa de soluciones	34
Tabla 3.3 Requerimientos y restricciones para el módulo de comunicación por internet.....	37
Tabla 3.4 Requerimientos y restricciones para el módulo de comunicación por internet.....	38
Tabla 3.5 Requerimientos y restricciones para el módulo de sensores.	39
Tabla 3.6 Requerimientos y restricciones para el módulo de almacenamiento de información.	41
Tabla 3.7 Requerimientos y restricciones para el módulo de interfaz de usuario.	42
Tabla 3.8 Requerimientos y restricciones para la unidad central de procesamiento.	43
Tabla 4.1. Muestras recolectadas del sensor de temperatura.....	56
Tabla 4.2 Porcentaje de error del sensor de temperatura, según el valor de referencia.....	56
Tabla 4.3 Muestras recolectadas del sensor de humedad.....	57
Tabla 4.4 Porcentaje de error del sensor de humedad, según el valor de referencia.....	57
Tabla 4.5 Parámetros característicos para la luz roja, verde y azul, tomada de [24].	58
Tabla 4.6 Muestras recolectadas del sensor de luminosidad.....	58
Tabla 4.7 Porcentaje de error del sensor de luminosidad, según el valor de referencia.	59
Tabla 4.8 Características de un bombillo comercial según el fabricante.	59
Tabla 4.9 Porcentaje de error del sensor de luminosidad, según el valor de referencia.	59
Tabla 4.10 Muestras recolectadas del sensor de dióxido de carbono CO ₂	60
Tabla 4.11 Porcentaje de error del sensor de dióxido de carbono, según el valor de referencia.	60
Tabla 4.12 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de sensores.	60
Tabla 4.13 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de almacenamiento de información.	62
Tabla 4.14 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de interfaz de usuario.	64
Tabla 4.15 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de comunicación por internet.....	66
Tabla 4.16 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de reloj en tiempo real.	69

Tabla A.1.1 Especificaciones técnicas de plataformas de desarrollo comerciales.	81
Tabla A.1.2 Especificaciones técnicas de diferentes sensores de temperatura y humedad.	82
Tabla A.1.3 Especificaciones técnicas de diferentes sensores de luz.	83
Tabla A.1.4 Especificaciones técnicas de diferentes sensores de dióxido de carbono.	83
Tabla A.1.5 Especificaciones técnicas de diferentes módulos de almacenamiento de información..	84
Tabla A.1.6 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de luz.	84
Tabla A.1.7 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de relojes en tiempo real.	85
Tabla A.1.8 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de pantallas táctiles.	85
Tabla A.1.9 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de ventiladores.	86
Tabla A.2.1 Características del sensor DHT22	88
Tabla A.2.2 Características del sensor TSL2561	88
Tabla A.2.3 Características del sensor de dióxido de carbono MG811.	89
Tabla A.2.4 Características del módulo WIFI ESP8266.	90
Tabla A.2.5 Características de las luces led Neopixel.	91

Capítulo 1: Introducción

La humanidad realiza la actividad agrícola desde tiempos muy lejanos, cuando la economía de las sociedades humanas evolucionara desde la recolección, la caza, la pesca hasta la agricultura y la ganadería. Las primeras plantas cultivadas fueron el trigo y la cebada, sus orígenes se pierden en la prehistoria y su desarrollo se gestó en varias culturas que la practicaron de forma independiente. Las razones de desarrollo de la agricultura pudieron ser debidas a cambios climáticos hacia temperaturas más templadas, también pudieron deberse a la escasez de caza o alimentos de recolección, o la desertización de amplias regiones.

Después de un tiempo a causa de la revolución industrial, se empezaron a ver cambios más acelerados de la agricultura, gracias a nuevas técnicas, maquinarias y formas de organización. Luego de eso surge un nuevo problema, ya que por causas de la revolución industrial, no se necesitaba de tanta mano de obra en las zonas agrícolas, alentando a que las poblaciones migraran a las zonas industriales, debido a esto, fue necesario empezar a realizar la agricultura industrial que permitiera poder generar una mayor cantidad de producción en el menor espacio posible.

Para solucionar estos problemas se empezaron a implementar nuevas tecnologías que iban a permitir el aumento de la producción y reducir los riesgos de pérdidas por plagas y enfermedades, fue así como nace la necesidad de utilizar químicos.

Luego de un tiempo, se logró comprobar que la utilización de este tipo de productos resolvía el problema a corto plazo, ya que los abonos químicos aumentan la producción en gran medida, los pesticidas eliminan las plagas y enfermedades, pero también se pudo comprobar que tenían efectos secundarios.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la agricultura representa la mayor proporción de uso de la tierra por el hombre, solo los pastos y

los cultivos ocupaban el 37 por ciento de la superficie de tierras de labranza del mundo en 1999, casi dos terceras partes del agua utilizada por el hombre se destina a la agricultura.

La producción agropecuaria tiene unos profundos efectos en el medio ambiente en conjunto, son la principal fuente de contaminación del agua por nitratos, fosfatos y plaguicidas. También son la mayor fuente antropogénica de gases responsables del efecto invernadero, metano y óxido nitroso, que contribuyen en gran medida a otros tipos de contaminación del aire y del agua.

Por otro lado la agricultura afecta también a la base de su propio futuro a través de la degradación de la tierra, la salinización, el exceso de extracción de agua y la reducción de la diversidad genética agropecuaria. [\[1\]](#)

Ante estas adversidades que posee la agricultura convencional y por lo que hoy en día en nuestro país existe un crecimiento desmedido de la población, sin ninguna planificación de las futuras edificaciones, dejando de al lado los lugares donde se produce la agricultura, a esto también se le agrega las consecuencias climatológicas de un constante cambio del clima por efectos de la contaminación que vivimos en la actualidad, y a eso se le suma que el agua cada vez es más escasa.

La población sigue creciendo, cada día hay más personas, lo que produce una demanda creciente de alimentos cultivados localmente y producidos de forma sostenible, e incluso los habitantes de las ciudades quieren que sus alimentos sean frescos y llenos de nutrientes, no pre-empaquetados y enviados desde miles de kilómetros de distancia.

Ante estas necesidades nace la agricultura protegida, en Costa Rica esta agroindustria está iniciando y no se dispone de información específica y local para la toma de decisiones. Existe una inconsistencia en la literatura acerca de la tecnología, los términos y definiciones para el trópico.

Los primeros invernaderos comerciales datan de la década de 1980, para la producción de plantas ornamentales para la exportación, el lanzamiento de esta industria proviene de las

políticas de diversificación agrícola del estado costarricense, en un decreto del Ministerio de Ambiente y Ganadería (MAG) llamado “Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola en Ambiente Protegido”

Sin embargo en nuestro país este tipo de ambientes se desarrollan en infraestructuras ya establecidas, que permiten algún grado de control sobre los factores ambientales y nutrición mineral. La idea principal es de proteger al cultivo de los efectos adversos del medio y generar un microclima diferente del existente en el exterior, el control de la temperatura y humedad del aire, se convierte en serios problemas a resolver para obtener altos rendimientos

Los principales factores biofísicos y prácticas agrícolas que influyen la calidad y rendimientos de los cultivos en la agricultura protegida se ilustran en la siguiente figura,

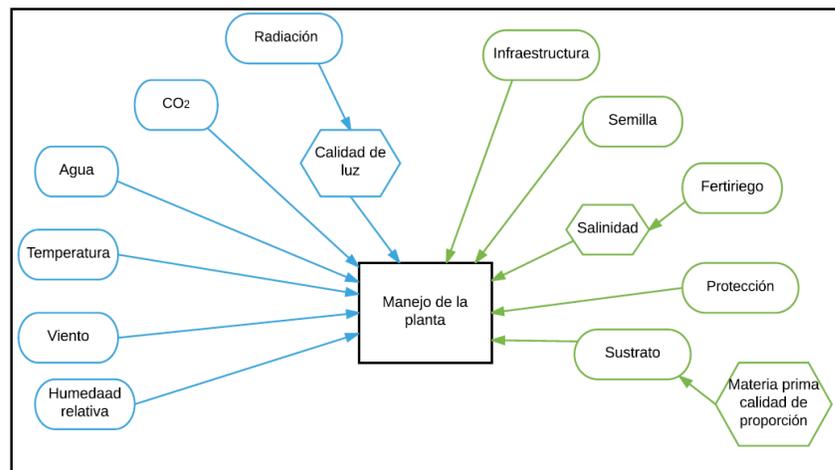


Figura 1.1 Calidad y rendimiento del cultivo en ambientes protegidos, adaptado de [2].

En la figura se observa de color celeste los factores biofísicos y de color verde las prácticas agrícolas. Factores como radiación, CO₂, agua, temperatura, viento y humedad relativa son los factores biofísicos que se le pueden brindar a la planta de forma controlada, elevando el nivel de producción ya que tendrá las condiciones idóneas la mayoría del tiempo, de esta forma se elevaría el nivel de producción y de calidad.

Con esto se trata de implementar un sistema controlado el cual ha surgido como una estrategia para poder administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de errores y obtener resultados deseados, de esta forma se quiere crear un ambiente apto para la obtención de hortalizas como la lechuga.

La producción en ambientes en los que no existe ningún intercambio de variables biofísicos como las mostradas en la figura 1.1, generan resultados positivos ya que no se necesitara proteger a los cultivos de las bajas temperaturas, se reducirá la velocidad del viento, así como los daños ocasionados por plagas, enfermedades, malezas, pájaros, ni de afluentes de agua contaminada que hoy en día utilizan los productores para regar sus cultivos.

Los tipos de ambiente protegido en los que se trabajan actualmente son casa de sombra, túneles o invernadero como tal, produciendo grandes ventajas como el mejor uso de los insumos, productos de mejor calidad y variabilidad.

Esta implementación es una mejora territorial, cuando es una infraestructura de larga duración y considerarse como equipos cuando se trate de estructuras móviles y de más corta duración, la conveniencia del invernadero se establece comprobando si el rendimiento económico es superior al interés del capital invertido, pero la magnitud de la inversión aumenta con la tecnificación de la infraestructura y las exigencias climáticas de los cultivos.

1.1 Objetivo y estructura del documento

El proyecto tiene como objetivo principal diseñar un prototipo de un sistema de ambiente controlado idóneo para el crecimiento de las plantas, el cual permita brindarle las condiciones necesarias para su respectivo desarrollo. Para esto se pretende desarrollar y validar un concepto de diseño de control y adquisición de datos que ofrezca las variables físicas como la temperatura, humedad, luminosidad y dióxido de carbono.

Se implementará un diseño que sea suficientemente flexible para incorporar mejoras a futuro, mediante el desarrollo de una prueba de concepto del sistema de ambiente controlado se

pretende evaluar la funcionabilidad del mismo para registrar información de diversas fuentes y enviarlas por comunicación WiFi a la nube para un monitoreo constante.

Este documento cuenta con la siguiente estructura, en el capítulo dos se presentan todos los conceptos teóricos necesarios para comprender el desarrollo de la solución. En el capítulo tres se presenta el desarrollo de software completo conjunto con la descripción del hardware utilizado. En el capítulo cuatro se presenta en detalle la validación y análisis de todos los módulos funcionales, el sistema de control y de adquisición de datos. Por último las conclusiones y recomendaciones para futuras mejoras se sitúan en el capítulo cinco.

Capítulo 2: Marco teórico

En este capítulo se van a tratar temas necesarios para comprender el desarrollo de la solución, además se pretende familiarizar al lector con los sistemas de ambientes controlados. Si desea ampliar los temas abordados a continuación, se recomienda revisar las referencias bibliográficas. [[1-10](#) y de la [15-23](#)]

2.1 Requerimientos de las plantas

El conocimiento de las necesidades edafoclimáticas¹ de los cultivos constituye una condición clave para desarrollar con éxito sistemas de producción agrícola, las condiciones ambientales ejercen una influencia determinante en el desarrollo y productividad de las especies de cultivo. Cuando se analiza el entorno ambiental de un terreno de producción, necesariamente se le debe considerar bajo la óptica de un sistema continuo suelo, planta y atmósfera, con la influencia de componentes climáticos, edáficos y de manejo del cultivo, así como sus interacciones. [[3](#)]

Los insumos ambientales básicos para el crecimiento y desarrollo de las plantas son el dióxido de carbono, el agua, la luz y la temperatura. El dióxido de carbono y la luz (radiación fotosintética activa) son la materia prima para realizar la fotosíntesis, proceso mediante el cual la planta transforma la energía luminosa en energía química produciendo carbohidratos. [[3](#)]

El agua el elemento fundamental para la vida de las plantas, más de tres cuartas partes de sus tejidos es agua. La actividad se reduce al mínimo cuando el agua escasea de manera significativa en el ambiente. La productividad de los cultivos está estrechamente asociada a la disponibilidad de humedad en los ambientes de producción, ya que esta juega un papel determinante en la transpiración y fotosíntesis de los cultivos al regular la actividad estomática, el agua además es

¹ *Edafoclimáticas*: Perteneciente o relativo al suelo y al clima.

el solvente primario en procesos fisiológicos por medio de los cuales gases, minerales y otros materiales entran a las células de la planta y son transportados a varias partes de la planta. [3]

La temperatura es determinante en la sucesión y velocidad de las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en los laboratorios internos de las plantas. Determina la adaptación, distribución, crecimiento y desarrollo de los cultivos. La temperatura afecta directamente la fotosíntesis, respiración, la permeabilidad de la pared celular, la absorción de agua y nutrimentos, la transpiración, la actividad enzimática y la coagulación de proteínas

2.1.1 El proceso de germinación

La germinación incorpora aquellos eventos que se inician con la absorción de agua por la semilla seca y terminan con la elongación del eje embrionario. El proceso concluye cuando la radícula² penetra y atraviesa las estructuras que rodean al embrión, lo que frecuentemente se conoce como germinación visible. El proceso de la germinación está dividido en tres fases, la imbibición³, la activación metabólica o germinación y el crecimiento de la radícula.

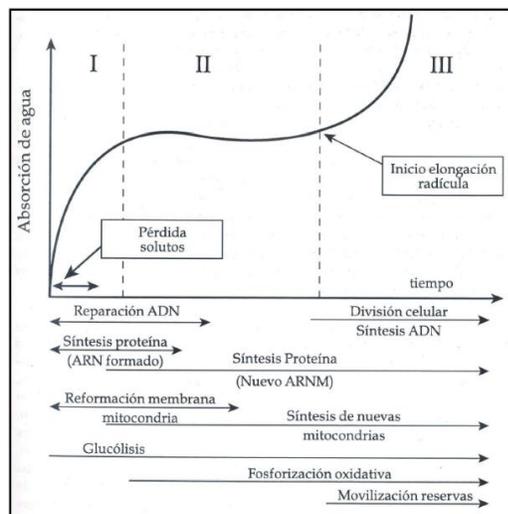


Figura 2.1 Curva de absorción de agua de las semillas y las actividades metabólicas asociadas con las diferentes fases, tomado de [4].

² *Radícula*: Parte del embrión de una planta que al desarrollarse da lugar a la raíz.

³ *Imbibición*: Desplazamiento de un fluido viscoso por otro fluido inmiscible con este.

➤ Fase I: imbibición

Con el ingreso de agua a la semilla durante la fase I, se producen, en forma temporal, alteraciones estructurales importantes, en particular en las membranas. En la semilla seca, los componentes fosfolípidos⁴ de la membrana se encuentran en la fase de gel, por lo que no están en su condición normal, lo que provoca una salida inicial mayor de solutos y de metabolitos de bajo peso molecular hacia la solución que rodea a la semilla. No obstante, con la rehidratación las membranas retornan rápidamente a un estado cristalino hidratado, condición más estable, por lo que prácticamente cesa la pérdida de solutos. La rehidratación permite que las enzimas y estructuras presentes en la semilla deshidratada, necesarias para el reinicio del metabolismo, se reactiven.

En general, se requieren varias horas antes de que el metabolismo alcance su pleno rendimiento. Durante ese período se observa la degradación o reemplazo de componentes dañados. En forma simultánea se observa la síntesis de ADN para reparar aquel que hubiese sido dañado durante la fase de maduración y deshidratación. Uno de los aspectos más importantes durante las primeras horas de la germinación es la reconstitución de las membranas.

Aun así, la curva de absorción de agua (Fig. 2.1) coincide con la del proceso respiratorio. Esto se debe a que en esta primera fase predomina el proceso glucolítico⁵, que ocurre en el citoplasma. Aunque la mitocondria no es funcional, muchas enzimas del ciclo de Krebs⁶ y oxidasas terminales están activas, lo que permite suministrar suficiente ATP⁷ (adenosín trifosfato) para mantener el metabolismo en esta fase inicial. En general, en aquellas semillas que almacenan almidón la actividad metabólica se reiniciara a partir de las mitocondrias preexistentes que

⁴ *Fosfolípidos*: son aquellas moléculas que poseen un extremo que absorbe el agua y otro que lo rechaza.

⁵ *Glucolítico*: proceso que ocurre con suministro inadecuado de oxígeno.

⁶ *Ciclo de Krebs*: Sucesión de reacciones químicas, que forma parte de la respiración celular.

⁷ *ATP*: Base nitrogenada fundamental en la obtención de energía celular.

fueron separadas, mientras que en las semillas que almacena lípidos, la actividad respiratoria requiere de la síntesis de nuevas mitocondrias.

➤ **Fase II: activación metabólica o germinación**

En esta fase se caracteriza por un cese en la absorción de agua y una actividad respiratoria más reducida. Predomina el ciclo de las pentosas fosfato⁸ se ha visto que sustancias inhibitorias⁹ de la respiración (Cianuro de potasio (KCN), Azida de sodio (NaN₃) y Sulfuro de sodio (Na₂S)) facilitan la germinación de muchas semillas, probablemente estimulando este ciclo. Esta activación puede ser debida también al hecho de que, durante la fase de imbibición, las estructuras externas que rodean a la semilla, así como la densa estructura interna que rodea al embrión, restringen la difusión del oxígeno gaseoso, lo que produce una deficiencia de este elemento. Esto resulta en una mayor producción de piruvato¹⁰ de la que puede ser utilizada por el ciclo de Krebs y la cadena transportada de electrones, reorientando el metabolismo hacia el ciclo de las pentosas fosfato.

Durante esta fase ocurre la síntesis, a partir de las reservas disponibles, de nuevas estructuras y compuestos necesarios para las fases siguientes del desarrollo. En este sentido, y contrario a la fase III, la germinación es principalmente anabólica¹¹ y por lo tanto endergónica¹², consumiendo la energía disponible.

Previo a la aparición de la radícula, se producen cambios transcripcionales en la elongación y división celulares. En general, los genes que codifican para el proceso de elongación tienden a ser activados en forma temprana, en relación con la división celular.

⁸ *Ciclo de las pentosas fosfato*: es una ruta metabólica estrechamente relacionada con la glucólisis.

⁹ *Inhibitorias*: Compuesto que tiene por efecto frenar o impedir algunas reacciones químicas.

¹⁰ *Piruvato*: Es un compuesto de importancia crucial en la bioquímica, ya que es el producto final de la glucólisis.

¹¹ *Anabólica*: Conjunto de procesos del metabolismo que tienen como resultado la síntesis de componentes celulares.

¹² *Endergónica*: Reacción química en donde el incremento de energía libre es positivo.

➤ Fase III: crecimiento de la radícula

Con la penetración de las envolturas de la semilla por parte de la radícula, se marca el final del proceso de germinación y el inicio del crecimiento de la plántula. Para que emerge la radícula, esta debe atravesar varias barreras internas, principalmente la testa y el endosperma¹³. En el caso de las semillas imbibidas, el potencial de presión del embrión presenta valores relativamente negativos, por lo que el potencial hídrico en sí mismo rara vez constituye un factor limitante para la germinación. En general, en una semilla entera, son los tejidos externos al embrión los que contienen la presión hidráulica ejercida por el embrión, limitando su absorción de agua y su expansión.

En la mayoría de las especies, la emergencia de la radícula requiere del debilitamiento de las estructuras que rodean la punta de la raíz. Este debilitamiento en las estructuras es producido, en muchas especies, por la degradación o separación de las paredes celulares del endosperma. En la siguiente figura se ejemplifica como está conformada la semilla en sus primeras etapas.

[4]

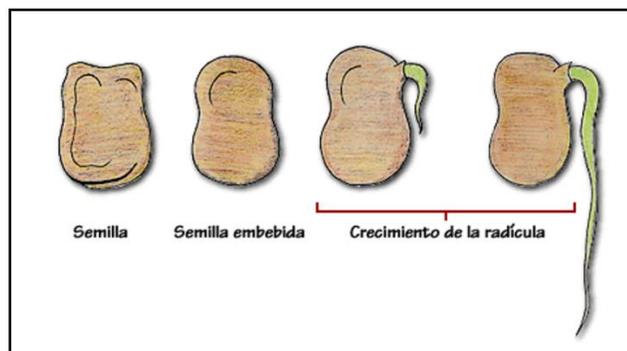


Figura 2.2 Etapa inicial de la germinación que comprende la imbibición y la aparición de la radícula, tomado de [5].

¹³ *Endosperma*: Es un depósito de alimentos para el embrión de las semillas de diversas plantas.

➤ Factores externos para la germinación de la semilla

La velocidad de germinación de las semillas depende de varios factores ambientales que actúan en forma continua y por periodos prolongados. Entre los más importantes se encuentra la disponibilidad de agua, la temperatura, el oxígeno, el dióxido de carbono y la disponibilidad de luz. Cada uno de estos factores puede inhibir o estimular la germinación, por lo que el efecto combinado de todos ellos determinara la duración y la tasa de germinación.

El primer factor es el agua el cual penetra las cubiertas de la semilla por capilaridad, si bien el agua es requerida para que ocurra la germinación, un exceso de la misma puede ser contraproducente a este proceso, al reducir la disponibilidad de oxígeno para el embrión. Las semillas presentan diferentes grados de sensibilidad al agua, que varía entre especies, e incluso, dentro de una misma especie. Por lo tanto, la humedad del sustrato puede afectar el proceso de germinación.

El segundo factor es la temperatura la cual influye sobre el proceso germinativo, interfiriendo con la disponibilidad de oxígeno para el embrión. Conforme se incrementa la temperatura, aumenta la intensidad de las reacciones metabólicas y a la vez disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua de imbibición, lo que reduce la cantidad de oxígeno disponible para el embrión. Si bien la temperatura aumenta, la velocidad de imbibición de la semilla, no afecta la tasa final de absorción.

Los requerimientos de temperatura son especialmente importantes para la ruptura de los procesos de latencia, las semillas de climas templados requieren de temperaturas frías por periodos prolongados para iniciar la germinación, mientras que en el caso de las semillas tropicales es común la necesidad de altas temperaturas para interrumpir el reposo.

Existe una temperatura óptima para la germinación, lo anterior dio origen a los criterios de temperaturas mínimas, óptimas y máximas de germinación. Sin embargo, con el tiempo, las proporciones de semillas germinadas a ambos lados de la temperatura óptima aumentaran hasta alcanzar los límites de germinación de la especie.

El tercer factor es el oxígeno el cual es indispensable para la germinación, en general, la estructura porosa de las cubiertas seminales permite la retención de una cierta cantidad de gases, que son liberados en el momento de la imbibición, y puede ser utilizado por el embrión en forma disuelta en el agua. La cantidad de oxígeno presente puede ser en muchos casos suficiente, incluso para semillas en condiciones de anoxia¹⁴, ya que la germinación requiere de poco oxígeno de 2 a 5 por ciento. Un exceso de oxígeno afecta la germinación, probablemente, al elevar la respiración. Uno de los factores que más afecta la cantidad de oxígeno disuelta en el agua es la temperatura.

El cuarto factor es el dióxido de carbono en concentraciones mayores a las del aire normal tiene un efecto inhibitor de la germinación. Los ámbitos en los cuales ocurre este fenómeno son muy variables, ya que en las especies estudiadas, los valores de CO₂ observados varían entre 4 a 28 por ciento. Estas concentraciones están muy relacionadas con el grado de profundidad con que están enterradas las semillas y el microambiente que se puede formar alrededor de ellas.

Y por último está el factor de la luz, mediante fotorreceptores como los fitocromos, las semillas perciben las condiciones de luz que las rodean. Los fitocromos perciben la luz en el rojo (660 nm) y el rojo lejano (720 nm). También podrían participar fotorreceptores en la luz azul, para las características generales sobre fotorreceptores. Con la imbibición ocurre una rápida rehidratación de los fitocromos presentes en la semilla seca, produciendo un incremento en la actividad de los mismos. Varias horas después de iniciada la imbibición, se observa otro pico de actividad. En general, la forma Pfr (que es la que percibe la luz roja lejano) es la forma activa de los fitocromos, responsable de estimular el proceso germinativo mediante la luz. Como algunas semillas pueden germinar aun colocadas en la oscuridad total, ellos sugiere que la forma Pfr ya se encontraba presente en la semilla o que no es indispensable para este proceso.

La luz tiene efectos múltiples en las semillas, y tanto su calidad como su intensidad afectan, según la especie, el proceso germinativo. Es posibles distinguir diferentes respuestas en la germinación de las semillas fotoblásticas a la luz, que van desde aquellas semillas VLFR (semillas

¹⁴ *Anoxia*: Falta o disminución de oxígeno en las células, los órganos o la sangre.

que germinan en flujos muy bajos de radiación) hasta aquellas semillas HIR (que requieren de alta radiación para germinar). Existe una clasificación para estas semillas, según sean los requerimientos de luz que ellas exijan para germinar, por ejemplo la lechuga es una semilla fotoblástica positiva (Semillas que necesitan de la luz para germinar).

La cobertura vegetal del suelo (una plantación o un bosque) afecta el balance R/FR^{15} (Red/Far Red) del espectro lumínico, alternando la relación entre P_r y P_{fr} , y con ello la germinación. Una breve exposición a condiciones VLFR, como durante las labores de labranza, en la preparación del terreno, favorece la germinación en muchas especies. A su vez, este tipo de luz permite la germinación bajo una densa cobertura boscosa. Por su parte, condiciones de LFR (flujo bajo de radiación) favorecen la germinación. Entonces, la inhibición bajo condiciones de HIR le permite a la semilla evitar germinar bajo condiciones de fuerte competencia de plantas con alta cobertura vegetal. [4]

2.1.2 Etapas iniciales de desarrollo de la plántula

Una vez concluido el proceso de germinación en sí mismo, el reto para la mayoría de las semillas es emerger del suelo y alcanzar la luz, y de esta manera iniciar los procesos de fotosíntesis y de asimilación. En la siguiente figura se muestra el proceso de crecimiento de la planta desde la germinación hasta el desarrollo total de la misma.

¹⁵ *R/FR*: R es red en inglés, rojo en español y FR es Far Red que en español significa rojo lejano

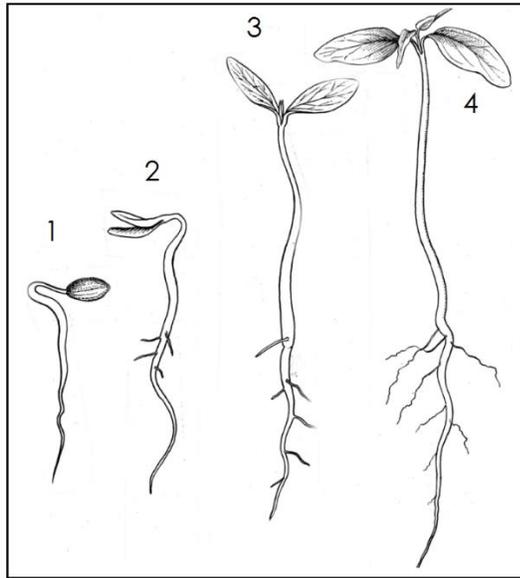


Figura 2.3 Etapas de crecimiento de una planta, modificado de [6].

La germinación de las semillas (ver figura 2.3, numeración 1 y 2) se ha clasificado como hipógea o epigea de acuerdo con la posición de las estructuras de reserva con respecto al suelo. En general, las semillas endospermicas, permanecen dentro del suelo durante la germinación, por lo que es hipógea. El hipocótilo¹⁶ se extiende y crece hacia abajo mientras que la radícula se desarrolla en una fuerte estructura primaria. Las raíces secundarias aparecen en la unión entre el hipocótilo y la radícula.

Por su parte, en semillas cuyas reservas están constituidas principalmente por los cotiledones¹⁷ la germinación es epigea. El hipocótilo emerge de la semilla presionando la radícula hacia abajo, mientras la porción superior se elonga hacia arriba a través del suelo, hasta emerger a la superficie. [4]

Luego de haber emergido a la superficie se empieza a desarrollar el crecimiento vegetal (ver figura 2.3, numeración 3 y 4) lo que significa un aumento de tamaño, a medida que crecen los organismos multicelulares a partir del cigoto¹⁸, no solo aumentan en volumen, sino también en

¹⁶ *Hipocótilo*: Término botánico usado para referirse a una parte de la planta que germina de una semilla.

¹⁷ *Cotiledones*: Son las hojas primordiales que se encuentran en el germen de la semilla.

¹⁸ *Cigoto*: Célula resultante de la unión de dos gametos

peso, número de células, cantidad de protoplasma¹⁹ y complejidad. Los aumentos de volumen (tamaño) a menudo se cuantifican en forma aproximada midiendo la expansión en solo una o dos direcciones, como longitud (por ejemplo altura del tallo), diámetro (de una rama) o área (de una hoja). Las mediciones de volumen, por ejemplo por desplazamiento de agua, pueden ser no destructivas, de modo que es posible medir varias veces la misma planta. Los aumentos de masa se miden con frecuencia cosechando la planta completa o la parte de interés y pesándola inmediatamente antes de que se evapore de ella mucha agua. Esto nos da la masa fresca, que es una cantidad un tanto variable porque depende del estatus hídrico de la planta. Por ejemplo, a menudo una hoja tiene mayor masa fresca por la mañana que al medio día, simplemente a causa de la transpiración. Debido a los problemas ocasionados por el contenido variable de agua, muchas personas, en especial las interesadas en la productividad de cultivos, prefieren emplear el aumento en masa seca de una planta o parte de ella como medida de su crecimiento. [7].

Algunas características del crecimiento vegetal se restringen a determinadas zonas que tienen células producidas recientemente por división celular en un meristemo²⁰. Es fácil confundir el crecimiento, ya definido como aumento en tamaño, con la división celular en los meristemas. La sola división celular no causa aumento de tamaño, pero los productos celulares de la división si se incrementan y originan el crecimiento. Las puntas de raíces y tallos tienen meristemas. Otras zonas meristematicas se encuentran en el cambio vascular e inmediatamente arriba de los nudos de las monocotiledóneas²¹, o en las bases de las hojas de herbáceas²². Los meristemas apicales de raíces y tallos se forman durante el desarrollo embrionario, mientras se origina la semilla, y se llama meristemas primarios. El cambio vascular y las zonas meristematicas de los

¹⁹ *Protoplasma*: Material viviente de la célula (núcleo y el citoplasma)

²⁰ *Meristemo*: Tejido joven o embrionario de los vegetales superiores que se halla en los lugares de crecimiento de la planta.

²¹ *Monocotiledóneas*: una clase de planta con flor como por ejemplo caña de azúcar, trigo, maíz y orquídeas entre otras.

²² *Herbáceas*: Una planta que no presenta órganos decididamente leñosos. (hierba)

nudos de monocotiledóneas y hojas de pasto no pueden diferenciarse sino hasta después de la germinación, y se les llama meristemas secundarios.

Algunas estructuras vegetales son determinadas, otras son indeterminadas, una estructura determinada crece hasta cierto tamaño y entonces se detienen, con el tiempo sufre envejecimiento y muere. Hojas, flores y frutos son buenos ejemplos de estructuras determinadas, y la gran mayoría de los animales también crecen en forma determinada. Por otro lado, el tallo y la raíz, vegetativos, son estructuras indeterminadas. Crecen por meristemas que continuamente se renuevan a sí mismo, permaneciendo jóvenes. [7].

Las plantas completas son en cierto sentido determinadas o indeterminadas, sin embargo se usan distintos términos para estos casos. Las especies monocárpicas solo florecen una vez y a continuación mueren, las especies policárpicas florecen, regresan a un modo vegetativo de crecimiento, y florecen cuando menos otra vez antes de morir. La mayoría de las especies monocárpicas son anuales (viven solo un año), aunque hay variaciones. A las especies monocárpica también se le podría llamar perenne porque sobreviven más de dos estaciones de crecimiento, por otro lado las plantas policárpicas por definición, no convierten todos sus meristemas vegetativos en reproductivos determinados. [7].

2.1.3 Necesidades básicas de las plantas

La fotosíntesis es importante por varias razones, desde el punto de vista humano, su mayor importancia es el papel que desempeña en la producción de alimentos y oxígeno, por lo cual se estudia a menudo en función de sus productos finales. Sin embargo, la principal virtud del proceso de fotosíntesis es la capacidad de atrapar la energía proveniente de la radiación del sol y transformarla en energía química, mediante una serie de complejas reacciones. Lo anterior puede considerarse en tres fases

- Absorción de la luz y retención de energía lumínica
- Conversión de energía lumínica en potencial químico
- Estabilización y almacenaje del potencial químico

La luz visible se considera como aquella porción del espectro electromagnético entre los 400 y 700 nanómetros, sin embargo, las plantas responden a un espectro de luz un poco más amplio alrededor de los 300 a 800 nanómetros.

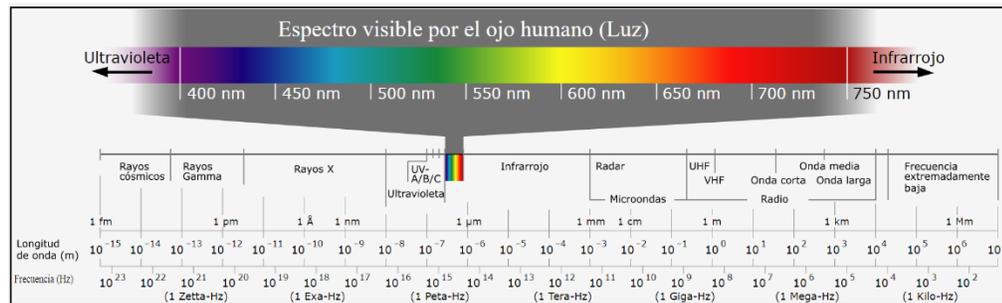


Figura 2.4 Espectro electromagnético de la energía radiante, tomado de [9].

La luz se transmite a la Tierra en forma de haces discretos de ondas de energía, llamados fotones. El número de ondas que pasan por un punto dado en el espacio, en un periodo de un segundo, es llamado frecuencia. La luz que viaja en longitudes de onda corta a mayores frecuencias, contiene más energía que la luz de longitud de onda más larga o de menor frecuencia

Los factores ambientales que afectan la tasa de fotosíntesis son

- Calidad de luz (longitud de onda)
- Intensidad de luz (brillantez)
- Duración de luz (fotoperiodo)
- Concentración de dióxido de carbono
- Temperatura
- Humedad
- Disponibilidad de agua

➤ **Calidad de Luz**

El color de la luz visible es una propiedad de su longitud de onda, por lo cual el nivel de energía de diferentes colores de luz puede ser variable. La luz, con menor longitud de onda y mayor

frecuencia, es cerca de 1.8 veces más energética que el mismo número de fotones de luz roja. La planta debe absorber luz para mantener en funciones la maquinaria fotosintética. La fotosíntesis ocurre en estructuras especiales y organelos llamados cloroplastos, ubicados en las hojas y tallos verdes, contienen pigmentos capaces de interceptar la luz y convertir la energía electromagnética en energía química, necesaria para realizar el proceso fotosintético. Cuando esos pigmentos, llamados clorofila A, clorofila B y algunos carotenoides²³, son irradiados con luz que contienen todas las longitudes de onda de luz visible, absorben la mayor parte de las porciones rojo y azul del espectro y reflejan la porción verde (por eso el ojo humano las percibe en color verde). La calidad de luz es particularmente importante cuando las plantas se desarrollan en invernaderos bajo condiciones de luz artificial. [8]

➤ **Intensidad de Luz**

La intensidad de la luz se define como la brillantez en forma de energía radiante, afecta el crecimiento de las plantas, pues altera la tasa de actividad fotosintética. El efecto varía con los diferentes tipos de plantas, algunas especies llamadas “amantes de la luz” requieren altas intensidades para crecer bien, por ejemplo maíz, papa, caña de azúcar y la mayoría de pastos.

Aquellas especies que no crecen bien bajo altas intensidades de luz se denominan “plantas de sombra”, muchas crecen adecuadamente en el piso sombreado de los bosques y algunas se utilizan como plantas ornamentales.

Las plantas productoras de semillas realizan parte de su crecimiento inicial en ausencia total de luz, ya que este tipo de planta gasta la energía almacenada en el endospermo de las semillas, tratando de crecer hacia donde se encuentra la luz. Aunque un periodo prologando de oscuridad mata a cualquier tipo de planta, sin importar el tamaño de su semilla, las plantas de semillas grandes viven más tiempo que las plantas de semillas pequeñas.

La intensidad de luz afecta el tamaño y la forma de las hojas diferencialmente, por lo general las hojas de las plantas crecerán más a bajas intensidades de luz (10 000 lux) que aquellas a

²³ *Carotenoides*: Pigmentos orgánicos que se encuentran de forma natural en plantas y otros organismos fotosintéticos.

intensidades más altas (50 000 lux). Así mismo, las hojas de plantas que crecen en altas intensidades de luz serán más gruesas que aquellas a bajas intensidades, en la siguiente tabla se muestran las diferencias que se presentan en el crecimiento de una planta con respecto a la intensidad de luz que recibe.

Tabla 2.1 Efectos diferentes para una planta según la intensidad de luz, tomados de [8].

Oscuridad total	Alta intensidad de luz (50 000 lux)
No fotosíntesis	Fotosíntesis alta
Color amarillo o blanco	Verde
Entrenudos largos	Entre nudos cortos
Sin hojas o muy pequeñas	Hojas normales grandes
Raíces finas como cabellos	Raíces grandes normales

Para determinada planta, se tiene una intensidad de luz en el cual las tasas de fotosíntesis y respiración son iguales por lo que el intercambio neto de gas es cero. Esta intensidad es el punto de compensación de luz, en el cual se presenta un equilibrio estable entre respiración y fotosíntesis sin embargo, aún se intercambia una pequeña cantidad de CO₂ (Dióxido de Carbono).

Se dice que la planta encuentra su punto de saturación de luz cuando los incrementos sucesivos en la intensidad ya no aumentan la actividad fotosintética. A intensidad de luz muy alta, la velocidad con la cual el CO₂ está disponible en la planta puede limitar la tasa de fotosíntesis. La intensidad de luz bajo la cual ocurre la saturación aumentara en la medida que la concentración de CO₂ alrededor de la planta también se incremente.

El punto de equilibrio, donde la concentración de CO₂ es tal, que la cantidad producida durante la respiración es exactamente igual a la fijada durante la fotosíntesis. Esta concentración de CO₂ se conoce como punto de compensación de dióxido de carbono, el cual se alcanza cuando una planta está creciendo a una intensidad de luz constante, mayor que el punto de compensación de luz. En el punto de compensación de CO₂, la fotosíntesis se reduce la concentración de CO₂ en el aire ambiental, hasta un nivel en el cual no ocurre una mayor asignación hasta que se produce una cantidad igual de CO₂ mediante la respiración. [8]

➤ **Duración de la Luz (fotoperiodo)**

La actividad fotosintética de las plantas es directamente proporcional a la duración del día, entre los límites y siendo todos los demás factores iguales, las hojas fotosintetizarán en la medida en que reciban la luz y crecerán más activamente. Los productores de hortalizas y flores que usan invernaderos para producir aun en invierno, generalmente, extienden el periodo de luz con iluminación artificial. Sin embargo, debe de considerarse que para obtener un efecto significativo en la fotosíntesis, se requiere una gran cantidad de luz artificial. [8]

➤ **Concentración de dióxido de carbono**

La concentración de CO₂ en el aire alrededor de las hojas afecta marcadamente la fotosíntesis. Normalmente, el contenido promedio de la atmósfera es de 0.03% de CO₂ y 21 % de oxígeno. Al incrementar la concentración de CO₂ a 0.10 % en un sistema cerrado se duplica la tasa fotosintética de algunos cultivos como trigo, arroz y algunos vegetales.

Las tasas de fotosíntesis de diferentes cultivos no solo se incrementan al aumentar la intensidad de luz, sino que amplía las concentraciones de CO₂, a menos que las estomas se cierren debido a condiciones de deficiencia hídrica. [8]

➤ **Temperatura**

A bajas temperaturas de luz (20 000 lux), la temperatura no ejerce un efecto notable en la tasa de fotosíntesis, pues la luz actúa como factor limitante. Sin embargo, como regla general, si la luz no es una limitante, la tasa de actividad fotosintética se duplica, aproximadamente, por cada 10 °C que se incrementa la temperatura en el ambiente de plantas en climas templados.

El efecto de la temperatura es diferente en cada especie, las plantas adaptadas a condiciones tropicales requieren una temperatura mayor para alcanzar la máxima tasa de fotosíntesis, que aquellas de regiones frías. Sin embargo temperaturas muy altas superiores a los 40 °C afectan la tasa fotosintética de la mayoría de las plantas no adaptadas, debido a que las estomas de las hojas tienden a cerrarse. [8]

➤ **Humedad**

La cantidad de vapor de agua presente en el aire comparada con la cantidad que el aire potencialmente puede retener a una temperatura determinada, se le conoce como humedad relativa (HR). El aire en los espacios intercelulares de una hoja hidratada podría tener una HR cercana al 100%, como la que tendría la atmósfera en un día lluvioso.

La humedad puede ser el factor ambiental más difícil de controlar en invernaderos. Incluso los equipos de control ambiental más sofisticados no pueden controlar perfectamente el nivel de humedad en invernaderos. Los niveles de humedad fluctúan con el cambio de la temperatura del aire y además, las plantas transpiran y agregan vapor de agua al ambiente constantemente. El aire húmedo contribuye directamente a los problemas, como enfermedades de las raíces y las hojas, secado lento del sustrato, estrés de las plantas, pérdidas de calidad, pérdidas de producción. [8].

➤ **Disponibilidad de agua.**

Al igual que el dióxido de carbono, el agua se usa en el proceso fotosintético, cuando disminuye la disponibilidad de agua para la planta, se restringe el intercambio de CO_2 y O_2 resultando una dramática reducción en la tasa fotosintética, dada la imperante necesidad de agua para mantener un elevado potencial hídrico en el protoplasma. La pérdida de agua inhibe directamente los procesos fotosintéticos, tanto las reacciones primarias de transporte de electrones y los eventos bioquímicos como la actividad enzimática en las reacciones secundarias. El principal resultado de la pérdida del potencial de presión es la disminución en la turgencia de las células guarda, lo que afecta la apertura de los estomas e interrumpe la entrada del CO_2 al interior de las hojas.

En términos generales, la tensión hídrica reduce la fotosíntesis y el área foliar, ocasiona el cierre estomático y disminuye la actividad de la maquinaria protoplasmática deshidratada. El efecto más grave de la falta de agua es la reducción de superficie fotosintetizadora y la producción de materia seca. [8].

2.2 Características de la lechuga

Conociendo los factores y necesidades para el desarrollo de las plantas desde su germinación hasta el desarrollo completo de la misma, se enfocara en la planta que se utilizara para comprobar la funcionabilidad del prototipo que se diseñara del ambiente controlado, a continuación se presentan algunas de sus características más representativas.

Existe gran variedad de lechuga cultivable, por lo cual se convierte en una planta ideal y apreciada en cultivos de huerto familiar. Además de tener una variada gama de sabores, colores y texturas a la hora de preparar ensaladas, sus ciclos vegetativos son diferentes, sembrando diversas clases en una misma fecha, se obtienen cosechas escalonadas en el tiempo, por tanto evita el sembrar cada 15 días si se quiere escalonar su consumo, en especial en los meses cálidos, la lechuga tiende a elongarse y a florecer con rapidez. [\[10\]](#)

La lechuga es una de esas especies en las cuales se observa con claridad la acción de la mano del hombre, en especial cuando su manejo es con un esquema orgánico. En estado silvestre, se trata de una planta pequeña, de sabor muy amargo que ha conseguido convertirse a lo largo de los siglos, en un espécimen enorme, de sabor dulce y muy jugoso. Ello implica que creciendo de modo espontaneo y sin recibir las atenciones debidas, (riego y materia orgánica abundante), tiende a volverse, reduciendo su tamaño y se torna amarga. [\[10\]](#)

Prefieren medios húmedos y frescos, crece bien a la sombra ya que sometidas a un sol intenso, tienden a dar semillas prematuramente. Por tal razón se desarrollan mejor en climas frescos y húmedos. En el tema de riego es crítico, debido a que este cultivo demanda gran cantidad de agua, principalmente en la fase inicial de formación, motivo por el cual se ve favorecido por un suelo que permanezca húmedo, aunque no tolera suelos encharcados, es decir, puntos altos de saturación de agua ya que contribuyen a pudriciones y diversas enfermedades. [\[10\]](#)

Hace un tiempo atrás se emplea el sistema de riego por goteo que permite dosificar los volúmenes de agua y las necesidades particulares de este cultivo según el suelo en que se

siembre. Otro sistema es el de exudación²⁴, que favorece de la misma manera que otros sistemas. Se utiliza con ciertas precauciones, el sistema por aspersión o con regadera, es especialmente en estados iniciales de crecimiento, siempre y cuando se provea de buena aireación al cultivo, para evitar la acumulación de láminas de agua sobre la superficie de las hojas, que pueda predisponer las plantas al ataque de enfermedades. [10]

Esta hortaliza crece vigorosamente, las semillas germinan entre 5 y 10 días, dependiendo de las condiciones climáticas. Sin embargo tiene diversos enemigos como caracoles y babosas que las atacan en la etapa posterior a la germinación. Por lo general todas las semillas germinan a la vez, por tanto es conveniente realizar un gran raleo o entresaque²⁵, dejando de 2 a 4 cm entre las plántulas para que se desarrollen apropiadamente, tanto que su parte aérea como en su parte radicular, una vez las plántulas alcanzan su desarrollo normal. [10]

En los últimos años, se viene imponiendo el sistema de plantación en bandejas, ubicadas en invernaderos sofisticados, para todas las variedades de lechuga, el trasplante efectúa de cuatro a cinco semanas, cuando la medida en hojas corresponde de cuatro a seis centímetros, lo cual indica que tiene un buen número para su trasplante al lugar definitivo. En el semillero hay que tener cuidado especial, ya que las malezas pueden ahogar las plántulas e impedir que emerjan y se desarrollen. [10]

El sustrato que más se usa en el semillero, es la turba²⁶, por sus condiciones de conservación de humedad y por su baja compactación, que permiten una buena germinación y desarrollo. [10]

Cultivar lechuga en forma orgánica, produce beneficios en cuanto a mayor tiempo de conservación pos cosecha con respecto a las del cultivo convencional. Se recomienda el consumo de lechuga fresca sin cocinar, ojala recién cortada, ya que unos pocos días después de la cosecha, pierden gran parte de sus propiedades nutritivas. [10]

²⁴ *Exudación*: Salida de un líquido de un cuerpo o del recipiente en que esta contenido, por transpiración o través de sus rendijas.

²⁵ *Raleo o entresaque*: se refiere a sacar o cortar algunas plántulas de un sembrado para aclararlo.

²⁶ *Turba*: Material orgánico de color pardo oscuro y rico en carbón

En la siguiente tabla se resume todos los requerimientos agroecológicos mínimos que necesita esta hortaliza para su crecimiento.

Tabla 2.2 Requerimientos agroecológicos de la lechuga, tomada de [6].

Cultivo Lechuga	
Ciclo de madurez	40 a 60 días
Tipo Fotosintético	C3 ²⁷
Fotoperiodo	Se considera una planta de día neutro o corto
Radiación (Luz)	Requiere condiciones intermedias de insolación
Temperatura diurna (°C)	14 a 18
Temperatura Nocturna (°C)	5 a 8
Humedad (%)	90
Precipitación (mm)	1000 a 1200

Luego de conocer las necesidades básicas de la planta es necesario tener claro que es un sistema de ambiente controlado.

2.3 Sistema de ambiente controlado

Un sistema de ambiente controlado, es capaz de crear un ambiente idóneo para la producción de algún tipo de hortaliza en este caso la lechuga como primera prueba, en donde es fundamental monitorear continuamente las condiciones ambientales exactas. En general sus operaciones están estrictamente reguladas según las necesidades que se requiere. El ambiente controlado cuenta con el control sobre las variables físicas como la humedad, temperatura, luminosidad y dióxido de carbono, las cuales son las más importantes en el desarrollo de cualquier ser vivo, incluyendo también el agua. Este tipo de sistemas idealmente no permiten

²⁷ C3: Se llama así porque el dióxido de carbono primero se incorpora en un compuesto de carbono 3 y mantiene las estomas abiertas durante el día.

el intercambio de variables físicas con el exterior, con esto se tiene gran eficiencia del contenido.

Según las necesidades básicas de las plantas se requiere un sistema de ambiente controlado como se presenta en la siguiente figura, teniendo en cuenta que se pueden agregar más variables físicas como el grado de acidez (pH). En el capítulo 3 se detalla cada componente que conforma este sistema. En la figura se muestra como estará conformado el prototipo del sistema de ambiente controlado, el tendrá una lámpara, los 4 sensores, el extractor de aire, el almacenamiento de los datos recolectados en una memoria flash y una interfaz de usuario para ver los datos que se van obteniendo en tiempo real. Así será como estará conformado el primer prototipo del ambiente controlado.

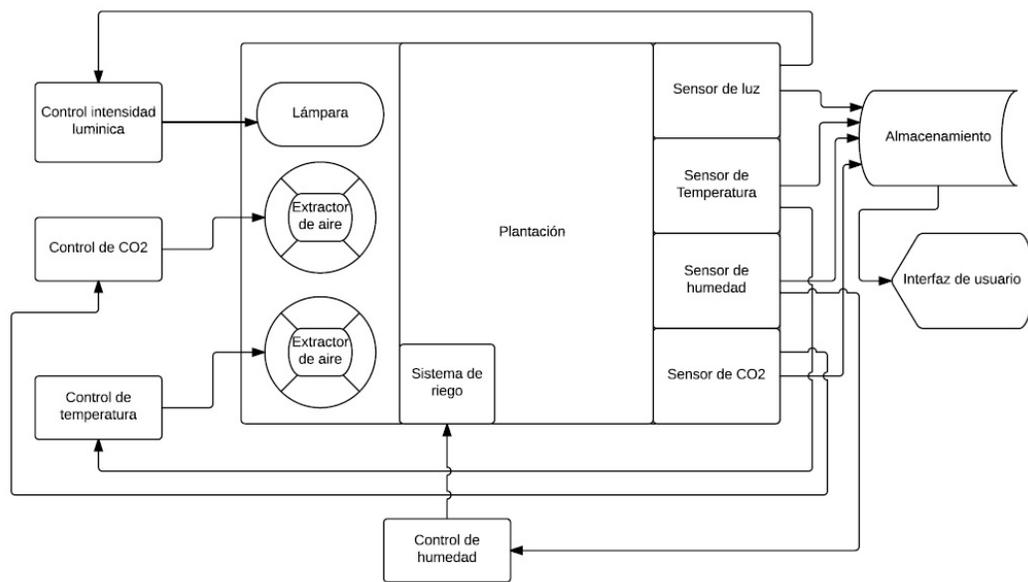


Figura 2.3.1 Diseño del prototipo del sistema de ambiente controlado.

2.4 Plataforma de procesamiento de datos Arduino

Una plataforma de desarrollo como el arduino se caracteriza por la utilización de código abierto, también está basado en un hardware y software de fácil acceso para desarrollar infinidad de aplicación, están conformadas generalmente por microcontroladores. El fabricante de dicha

plataforma facilita el entorno de programación el cual está basado en un lenguaje de un alto nivel.

Este tipo de plataformas están construidos con los microcontroladores de la familia Atmel AVR y se caracterizan por tener un tamaño de 8 bits, además dicha plataforma cuenta con buses externos o conectores el cual brindan la facilidad para tener contacto con las terminales del microcontrolador de una forma más sencilla.

Para su programación se utiliza un bootloader el cual permite cargar mediante el puerto serial los archivos de programación con la finalidad de no utilizar programadores externos, por ultimo cuentan con un chip FTDI FT232 el cual se encarga de establecer la comunicación serial con un computador y además le da privilegio de alimentarse a través de un puerto USB.

2.5 Protocolos de comunicación

El primer protocolo que se utiliza es el de comunicación I²C (Inter-integrated Circuit) el cual fue desarrollado por Phillips al inicio de la década de 1980, actualmente los principales fabricantes de dispositivos semiconductores ofrecen circuitos que implementan un bus I²C para su control. Independientemente del fabricante cada dispositivo electrónico deberá poseer la misma dirección oficial I²C siempre y cuando cumplan la misma función. [11].

El bus I²C solo define dos señales, las cuales son el SDA (Serial Data) el cual es la línea de datos semidireccional entre el dispositivo y la plataforma con la que se vaya a conectar. La otra señal es la del reloj llamada SCL (Serial Clock), la cual genera la señal de sincronía y suele tener la capacidad de evaluar su estado. En la siguiente figura se muestra el diagrama de interconexión general para este protocolo. [11].

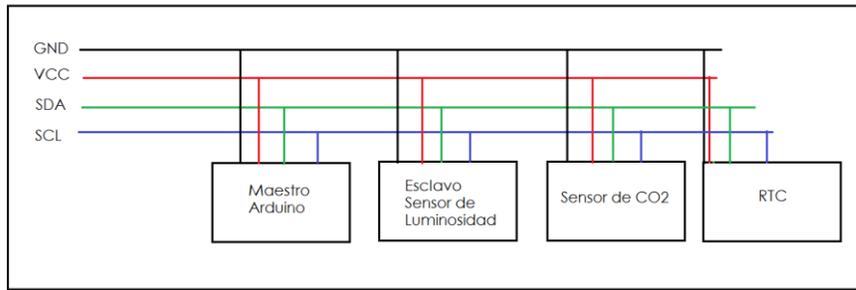


Figura 2.5 Diagrama de interconexión para el protocolo I2C.

Otro protocolo utilizado es el Universal Asíncrono Transmisor Receptor (UART), también llamado Interfaz de comunicaciones seria (SCI), el mismo tiene la posibilidad de funcionar como un sistema de comunicaciones full dúplex o bidireccional síncrono, además posee la facilidad de adaptarse con periféricos o dispositivos que utilicen este protocolo. Estos buses de datos están compuestos por 3 líneas fundamentales las cuales son *TX*, *RX* y *GND*. De tal manera que el pin *TX* de un dispositivo esté conectado con *RX* del otro dispositivo y viceversa. Si solo se conecta un *TX* a un *RX*, la comunicación puede existir de manera unidireccional, es decir, que solo 1 envía y solo 1 recibe. Lo que hace muy útil a este puerto es que trabaja con niveles lógicos *TTL (transistor-transistor logic)* lo cual hace que dos micros se puedan comunicar sin necesidad de convertir los voltajes. [12].

A continuación se muestra como es la debida conexión de este protocolo.

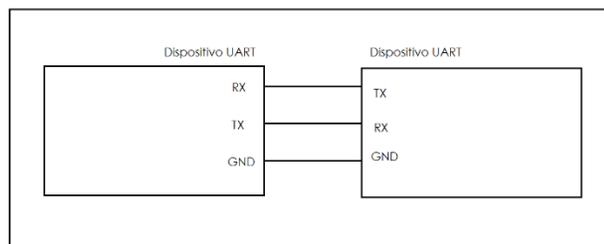


Figura 2.5.2 Diagrama de interconexión para el protocolo UART.

Para la comunicación WiFi se utiliza el conjunto de comandos más comúnmente usados, los cuales son los AT, fueron originalmente desarrollados por Hayes Microcomputer Company

cuando ellos empezaron a manufacturar su Hayes Smart modems. Esto facilita a que el programa de comunicaciones debe ser capaz de seleccionar los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento con el destino al cual se conecta, de esta forma para que el programa de comunicaciones pueda “hablar” con el modem, debe haber algún tipo de protocolo, el cual es el objetivo de los comandos AT.

En la actualidad los modems son programables en su totalidad, usualmente cada dispositivo puede funcionar perfectamente recién salido de la fábrica, pero es necesario ajustarle algunos parámetros para un mejor funcionamiento, por ejemplo, la asignación de la velocidad de transmisión.

La asignación de los registros de un modem se realiza haciendo una comunicación, esto se da usualmente por el hecho de que el programa de comunicaciones está en modo local, este modo es por lo general automático a la hora de encender el modem y hasta que no se establezca algún tipo de enlace.

La tabla 2.3 contiene los comandos más comunes que se utilizan en los módulos WiFi.

Tabla 2.3 Lista de comandos AT, tomados de [13].

Función	Comando AT	Respuesta del modulo
Working	AT	OK
Restart	AT + RST	OK
Firmware versión	AT + GMR	AT + GMR 0018999902 OK
List Access Points	AT + CWLAP	AT + CWLAP + CWLAP (4,"RocheFortSurLac",- 38,"70:62:b8:6f:58",1) + CWLAP: (4,"LiliPad2.4",- 83,"f8:7b:8c:1e:7c:6d",1) Ok
Join Access Point	AT + CWJAP? AT + CWJAP="SSID","Password"	Query AT+CWJAP? +CWJAP:"RocheFortSurLac" OK
Quit Access Point	AT+CWQAP=? AT+CWQAP	Query OK
Get IP Address	AT+CIFSR	AT+CIFSR 192.168.0.105 OK
Set Parameters of Access Point	AT+CWSAP? AT+CWSAP=<ssid>,<pwd>,<chl>,<ecn>	Query ssid,pwd chl=channel,ecn+encryption
WiFi Mode	AT+CWMODE?	Query

	AT+CWMODE=1 AT+CWMODE=2 AT+CWMODE=3	STA AP BOTH
Set up TCP or UDP connection	AT+CIPSTART=? (CIPMUX=0) AT+CIPSTART= <type>,<addr>,<port> (CIPMUX=1) AT+CIPSTART= <id><type>,<addr>,<port>	Query Id=0-4,type=TCP/UDP,addr=IP address, port=port
TCP/UDP Connections	AT+CIPMUX? AT+CIPMUX=0 AT+CIPMUX=1	Query Single Multiple
Check join devices'IP	AT+CWLIF	
TCP/IP Connection Status	AT+CIPSTATUS	AT+CIPSTATUS? No this fun
Send TCP/IP data	(CIPMUX=0) AT+CIPSEND=<length>; (CIPMUX=1)AT+CIPSEND=<id>,<lenght>	
Close TCP/UDP connection	AT+CIPCLOSE=<id> or AT+CIPCLODE	
Set as server	AT+CIPSERVER=<mode>,[,<port>]	Mode 0 to close server mode, mode 1 to open, port = port
Set the server timeout	AT+CIPSTO? AT+CIPSTO=<time>	Query <time>0~2880 in seconds
Baud Rate*	AT+CIOBAUD? Supported: 9600, 19200, 38400,74880,115200,230400,460800,921600	Query AT+CIOBAUD?+CIOBAUD :9600 OK
Check IP address	AT+CIFSR	AT+CIFSR 192.168.0.106 OK
Firmware Upgrade (from Cloud)	AT+CIUPDATE	1. +CIPUPDATE:1 found server 2. +CIPUPDATE:2 connect server 3. +CIPUPDATE:3 got edition 4. +CIPUPDATE:4 start update
Received data	+IPD	(CIPMUX=0):+IPD,<len>: (CIPMUX=1): +IPD, <id>, <len>:<data>
Wathdog Enable*	AT+CSYSWDTENABLE	Watchdog, auto restart when program errors occur: enable
Whatdog Disable*	AT+CSYSWDTDISABLE	Watchdog, auto restart when program errors occur: disable

2.6 Medición de variables físicas

Las variables físicas que se tienen presentes dentro del sistema de ambiente controlado son la temperatura, humedad, luminosidad y dióxido de carbono. En las siguientes secciones se explicara cómo se realizara la medición de cada uno de ellos.

2.6.1 Luminosidad

La Luz se llama a la parte de la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano, pero posee un sentido más amplio e incluye todo el campo de la radiación conocido como espectro electromagnético. Para realizar la medición de iluminación en un lugar particular se utiliza el lux (lx), que es la unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades para la iluminancia o nivel de iluminación, es equivalente a un lumen entre metro cuadrado (lm/m^2).
Equivalencia $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}/\text{m}^2$

2.6.2 Temperatura

La medición de la temperatura se realiza con un sensor el cual se utiliza para adquirir datos actuales del medio. La señal eléctrica de salida por lo general se representa por un valor analógico proporcional a la medición realizada según corresponda en la hoja especificada de cada sensor. Es necesario contar con una etapa posterior que almacene y traduzca el valor obtenido por el sensor en una medida estándar como los grados Celsius.

2.6.3 Humedad

La medición de la humedad relativa se basa en la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener, por lo tanto un par de cables ubicados muy cercanos pero sin hacer contacto eléctrico pueden conducir una pequeña cantidad de corriente si el ambiente está húmedo.

2.6.4 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono el cual es un gas incoloro, inodoro y vital para la vida en la tierra, existe en la atmósfera como gas traza a una concentración de alrededor de 0,04% (400 ppm) en volumen. Su medición se realiza con un sensor el cual contiene un circuito de acondicionamiento de la señal para amplificar la salida y un circuito de calefacción a bordo para el calentamiento del sensor. Por lo general son altamente sensibles al alcohol y monóxido de carbono, podrían ser utilizados en el control de la calidad del aire.

Capítulo 3: Diseño y desarrollo del sistema de ambiente controlado.

En este capítulo se realiza la explicación detallada del proceso de diseño, la cual está conformada por la selección óptima de los componentes de hardware e implementación del sistema, desarrollando el ambiente controlado.

Primeramente se inicia el proyecto definiendo los requerimientos mínimos y sus correspondientes limitaciones que deberá contemplar el diseño. De esta forma se procedió a tabular cada uno de los requerimientos y restricciones, definidos en conjunto con los asesores del proyecto.

Tabla 3.1 Requerimientos y restricciones mínimas.

Requerimientos	Indicadores	Restricciones	Indicadores
Capacidad de cuantificar variables físicas para un ambiente controlado	Precisión $\pm 10\%$	Proporcionar o garantizar condiciones óptimas de funcionamiento.	Rango dinámico de operación. (contar con suministro eléctrico de 110 v)
Capacidad de controlar las variables físicas para un ambiente controlado	Mantener condiciones idóneas temperatura de 18 °, humedad de 60 %, dióxido de carbono 400 ppm y luminosidad 80 lux.	Consumo de potencia	Un consumo menor a 200 watts
Capacidad de operar sin manipulación del usuario	El sistema se pueda controlar solo	Bajo costo de implementación	Costo a nivel económico menor a \$10 000
Almacenamiento de los datos obtenidos	Tarjeta micro SD ≥ 8 GB		
Interfaz de Usuario	Visualización de los datos en la pantalla (Temperatura, humedad, luminosidad y CO ₂)		
Transmisión de datos por medio de internet	Visualización de los datos obtenidos por medio de gráficos y tablas en forma remota		

3.1 Análisis y selección final de la solución.

Conociendo los requerimientos necesarios se formulan tres posibles soluciones las cuales cumplen con la capacidad de desarrollar un ambiente controlado que satisfaga los mínimos requerimientos y restricciones propuestos por el equipo de trabajo responsable del proyecto.

3.1.1 Solución 1: Adquisición de un sistema comercial.

Existen sistemas comerciales que permiten controlar ambiente de cultivos agrícolas, Sin embargo el costo es superior a los ocho mil dólares, para un sistema con un solo módulo que cumpla con las funciones necesarias, por lo que dependiendo de la cantidad de módulos que el cliente necesite así va a ser el costo total por el sistema. Una gran desventaja de estos sistemas, según su configuración vienen totalmente cerrados, por lo que el usuario no podrá modificar o mejorar su funcionamiento.

3.1.2 Solución 2: Diseñar y crear los dispositivos de medición.

En vista del costo elevado de un sistema comercial, se podría desarrollar el sistema de control a partir de módulos implementados y diseñados desde cero. De esta forma se diseñan los circuitos integrados necesarios para cumplir las funciones respectivas de los requerimientos, lo cual se prolongaría la solución respecto a la necesidad de la empresa. También existiría un margen de error más alto ya que se tendrá que crear cada PCB (Printed Circuit Board) por lo que se podría dificultar la implementación del sistema.

3.1.3 Solución 3: Crear el sistema open hardware y software.

El mercado brinda grandes cantidades de variables en el momento de implementar circuitos y sistemas, a un muy buen costo por unidad según la necesidad que se tenga. Por lo que es realmente rentable comprar el hardware necesario para el desarrollo del proyecto según lo que nos ofrece los fabricantes de componentes electrónicos. También tienen la gran ventaja de

utilizar software libre disponible en repositorios y distintos sitios de la web. Esta solución ofrece una mayor facilidad de expandirse, ya que uno podrá modificar ya sea agregando o quitando dispositivos según su necesidad, con un costo accesible.

3.1.4 Comparación y selección de la solución

Teniendo las posibles soluciones ya planteadas, se realizara una tabla comparativa la cual ayudara a determinar la propuesta de diseño que se ajuste a las necesidades del proyecto y tenga el mejor rendimiento. En la tabla 3.2 se muestran diferentes comparativas para la determinación de la propuesta de diseño, donde se numera de la siguiente manera:

- Muy bueno con un 4
- Bueno con un 3
- Regular con un 2
- Malo con un 1

Tabla 3.2 Comparativa de soluciones

Características	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Funcionabilidad	4	3	4
Flexibilidad	3	3	4
Consumo eléctrico	4	4	4
Costo	2	2	4
Tiempo de desarrollo	4	2	4
Ponderación	3	2	4

En la tabla anterior se muestra la funcionabilidad de las tres posibles soluciones al proyecto, las cuales cumplen la función específica de poder controlar el sistema para desarrollar cultivos. La solución 2 al ser una implementación desde cero, podría presentar futuros errores en los circuitos, ya que se tendría que diseñar y construir el PCB. Tiene sus ventajas ya que se puede diseñarlo según sus necesidades, cosa que la solución 1 no cumple. En la solución 3 al adquirir todo ya fabricado da mejor margen de utilidad y de seguridad ya que según las indicaciones de

los diferentes fabricantes, los módulos servirán de acuerdo con su funcionabilidad. Lo cual es una garantía de funcionabilidad y un gran ahorro de tiempo.

Con respecto a la flexibilidad es notable que en la solución 3 al adquirir todo independiente sería mucho más fácil agregar o quitar módulos. De esta forma se garantiza que el sistema podrá tener diferentes funciones de acuerdo al tipo de cultivo que se esté desarrollando. Y a su vez se pueden realizar diferentes mejoras ajustando perfectamente a lo que se quiere sin necesidad de adaptación de otra placa de interconexión. En cambio para la solución 1 la inclusión de más módulos implementa un costo altamente elevado según el fabricante.

Referente al consumo eléctrico, básicamente los tres presentaría un nivel muy similar de consumo eléctrico ya que estos dispositivos no suelen consumir mucha potencia por la cual los tres estarían en las mismas condiciones de trabajo. Claro está lo más adecuado es reducir el uso de energía para que el sistema sea rentable.

En cuanto a costo, para la solución 1 el monto para poder adquirir uno es realmente elevado ya que depende de la marca y en Costa Rica no se vende este tipo de equipos, lo más cercano es en México o en Estados Unidos, a el costo real del equipo habría que sumarle el envío de estos lugares, elevando el precio del mismo. De tal forma habría que capacitarse para hacer uso correcto del sistema lo cual involucra otro rubro más al proyecto. Para las soluciones 2 y 3 el costo no es muy elevado sin embargo se podría incrementar en la solución 2 ya que para realizar los PCB se necesita de un equipo en especial con el que no se cuenta, por los que le daría un costo más a su implementación. De esta forma comprando el hardware listo para utilizar como lo explica la solución 3, sería la más rentable económicamente ya que agiliza el proyecto, no habría que fabricar cada componente, y en caso de que resulten defectuosos se pueden sustituir de una manera rápida.

De acuerdo a las comparaciones realizadas para las tres diferentes soluciones, se deberá escoger la propuesta de la solución número 3, la cual es la más acorde para poder realizar el diseño e implementación del prototipo funcional, el cual realizara un ambiente controlado para la producción de hortalizas, incorporando mejoras a futuro con suficiente flexibilidad para

realizar modificaciones al sistema de datos, con bajo costo, consumo eléctrico y tiempo de implementación.

3.2 Desarrollo del concepto de diseño.

De acuerdo con la propuesta de la solución seleccionada, se explicara a continuación el concepto de diseño que contiene toda la conformación a nivel modular para llevar a cabo la implementación del sistema de ambiente controlado y a su vez la explicación de la funcionabilidad de cada módulo por separado, de acuerdo a las especificaciones definidas. En la siguiente figura se muestra el diseño modular del sistema.

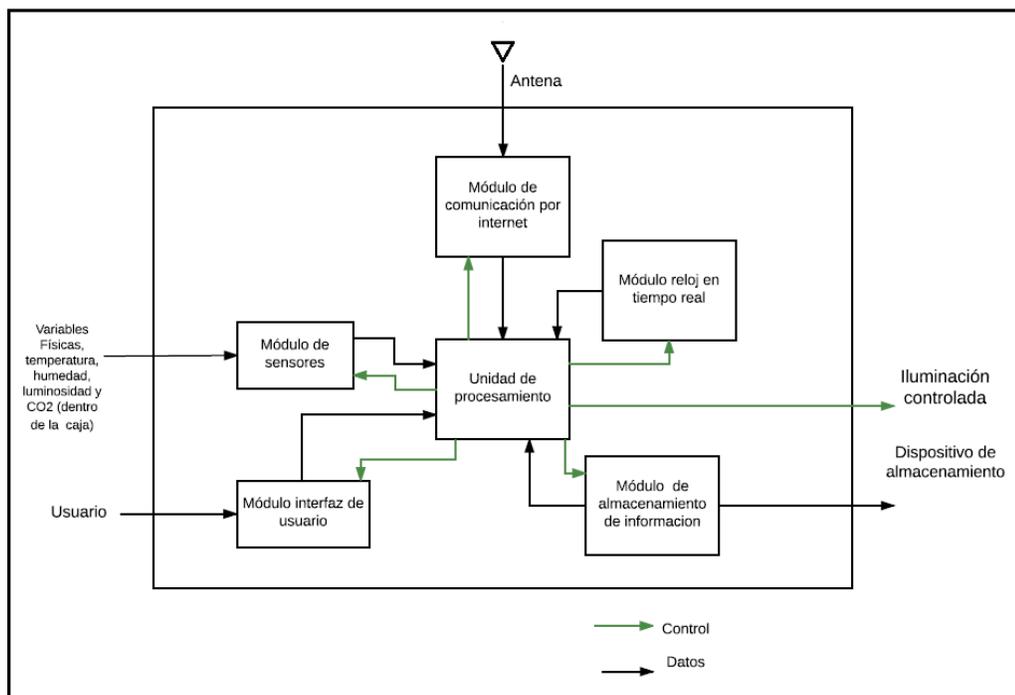


Figura 3.1 Diseño modular para el sistema de ambiente controlado.

3.3 Descripción de los módulos.

En esta sección se explica detalladamente como es la conformación de cada módulo, donde se detalla para cada una de las entradas y salidas, también la selección de los dispositivos electrónicos seleccionados.

3.3.1 Módulo de comunicación por internet.

Con respecto a este módulo se trata de poder comunicar los datos que se están obteniendo en tiempo real en la caja, de esta forma se podrá acceder vía internet a la base de datos que se está desarrollando.

Tabla 3.3 Requerimientos y restricciones para el módulo de comunicación por internet.

Requerimientos	Restricciones
Conexión con una tasa de transferencia alta	Costo
Envío constante de datos	
Contar al menos con conexión vía WiFi o Ethernet	

Objetivo

- Obtener una conexión del prototipo con el internet.

Entradas

- Datos recopilados por el microcontrolador de los diferentes sensores en funcionamiento.

Salidas

- Los datos que son subidos a la plataforma de thingspeak para la visualización de los mismos.

3.3.2 Módulo de reloj en tiempo real.

Con este módulo lo que se quiere básicamente es que el sistema de ambiente controlado realice automáticamente la función de riego diario a las plantas que se estén cultivando, por lo que no

se necesita de alguna persona en específico que deba de hacer la tarea. La idea es tornar un ambiente totalmente autónomo y eficaz.

Tabla 3.4 Requerimientos y restricciones para el módulo de comunicación por internet.

Requerimientos	Restricciones
Formato de hora, día, mes, año	Costos
Formato del reloj en segundos	
Alta precisión, batería aparte	

Objetivo

- Obtener una base de tiempo con una alta precisión y con un formato de horas, minutos, segundos y días.

Entradas

- Señales de control y datos provenientes del microcontrolador.

Salidas

- Señal que activara una electroválvula para el riego por goteo respectivo.

EL RTC (Real time clock) se caracteriza por tener varios beneficios como el bajo consumo de energía, libera de trabajo el sistema principal para que pueda dedicarse a tareas más críticas y algunas veces es más preciso que otros métodos. Por lo general estos sistemas cuentan con una fuente de alimentación alternativa, por lo que pueden seguir midiendo el tiempo mientras la fuente de alimentación principal está apagada o no está disponible.

3.3.3 Módulo de sensores.

Este módulo tiene la función de recolectar la información que se van obteniendo del sistema controlado, los sensores serán el de humedad, temperatura, luminosidad y dióxido de carbono. En la siguiente tabla se muestran los requerimientos y restricciones para dicho modulo.

Tabla 3.5 Requerimientos y restricciones para el módulo de sensores.

Requerimientos	Restricciones
Humedad	Costo
Temperatura	
Dióxido de carbono	
Luminosidad	
Precisión	

Objetivo

- Recolectar información proveniente de los diferentes sensores y enviarlos al microcontrolador.

Entradas

- Las señales que provienen de los tres diferentes sensores, al igual que las señales de control que vienen del microcontrolador.

Salidas

- Los datos provenientes de las distintas mediciones que harán los sensores con dirección hacia el microcontrolador.

Para la temperatura y humedad se eligió el sensor DHT-22 el cual permite realizar dichas mediciones, el sensor posee una interfaz serial propietaria, que solo requiere de un pin para

comunicarse con el microcontrolador. Se requiere de una alimentación entre los 3.3 a 5 v, tomando como valor recomendado 5v, posee una resolución decimal, es decir, los valores tanto para humedad como para temperatura serán números con una cifra decimal. Tiene un tiempo de muestreo de 2 segundos, es decir, solo nos puede ofrecer datos cada dos segundos, con un rango de valores desde -40°C hasta 80°C de temperatura y en humedad de 0 % hasta 99,9% de humedad relativa. La precisión que tiene para la temperatura es de $\pm 0.5\%$ °C, $\pm 1\%$ °C como máximo en condiciones adversas, y para la humedad es de $\pm 2\%$ RH, a una temperatura de 25 °C. El tiempo de respuesta es menor a los 10 segundos, para la temperatura, es decir, de media, tarda menos de ese tiempo en reflejar un cambio de temperatura real en el entorno y para la humedad tiene un tiempo menor de 5 segundos.

Con la luminosidad se eligió utilizar el sensor TSL2561 el cual es un sensor de luz digital avanzada, es un sensor muy preciso, permitiendo cálculos exactos de luz y puede ser configurado sobre la marcha con diferentes rangos de ganancia para detectar rangos de luz de hasta 0.1 a 40000 lux. La mejor parte de este sensor es que contiene diodos tanto en el espectro infrarrojo como en el completo, esto significa que permite realizar mediciones separadas de luz infrarroja y de espectro completo o luz visible al ojo humano. El sensor tiene una interfaz digital I2C, el consumo de corriente es extremadamente bajo, así que es perfecto para registro de datos de baja potencia alrededor de los 0.5 mA al detectar actividad y menos de 15 μ A en modo apagado. Posee un rango de temperatura de -30°C hasta 80°C, un rango de voltaje de alimentación 2.7 a 3.6 v.

Para la parte de iluminación se eligió las luces led Neopixel RGB de adafruit, la cual es una tira de 60 leds en un metro, cada led se puede controlar individualmente. La alimentación ideal para que todos brillen bien es de 5 v/10A pero al ser solo un metro puede bastar con una alimentación de 5 v/2A. El tipo de led es el WS2812B, cada led de estos se alimenta con 5v, poseen un chip driver encapsulado en el mismo led que proporciona la corriente constante necesaria para dar la luminosidad a cada uno de los colores. Lo normal es que el chip funcione con tres líneas de 5 v, tierra y los datos. Cada led recibe 24 bits (8 bits por cada canal de color),

que almacena y luego retransmite el resto del flujo de datos al siguiente led conectado en la cadena.

Y por último se eligió el sensor de dióxido de carbono (CO₂) MG811 el cual tiene una alta sensibilidad, es estable y de larga vida. Se debe alimentar con una potencia de 6.5 a 12 V, con una corriente de 160 mA, su rango de temperatura es de -20°C hasta 50°C.

3.3.4 Módulo de almacenamiento de información.

En este módulo se almacenara la información proveniente del módulo de sensores, con un formato de registro asignado por la unidad de procesamiento central. En la tabla 3.6 se muestran los requerimientos y restricciones planteados.

Tabla 3.6 Requerimientos y restricciones para el módulo de almacenamiento de información.

Requerimientos	Restricciones
Capacidad de memoria mayor a 8 GB	Costo
Compatible con una SD	
Protocolo de comunicación	

Objetivo

- Almacenar la información proveniente de los diferentes sensores.

Entradas

- Las señales de control y datos que provienen del microcontrolador.

Salidas

- Sera un medio de almacenamiento extraíble, tal como una tarjeta SD.

Con el shield²⁸ SD podemos escribir o leer en el dispositivo de almacenamiento, es compatible con SD, SDHC y tarjetas micro SD estándar, solo se necesita el puerto SPI de la placa arduino. Se alimenta de 5 v máximo con una corriente de 200 mA. Conociendo con los microcontroladores como arduino incluye una memoria EEPROM interna que podemos usar como mini disco duro, no se puede comparar con la posibilidad de disponer de una tarjeta SD intercambiable, especialmente en lo que a capacidad se refiere. Con este shield podemos ir almacenándolo los datos que vamos leyendo del módulo de sensores, normalmente en combinación con un reloj en tiempo real RTC, y a los que posteriormente podemos acceder y procesar.

3.3.5 Módulo de interfaz de usuario.

Este módulo se encargara de la visualización que podrá tener el usuario con el sistema de desarrollo del ambiente controlado, en la tabla 3.7 se muestran las características y restricciones planteadas.

Tabla 3.7 Requerimientos y restricciones para el módulo de interfaz de usuario.

Requerimientos	Restricciones
Contar con una pantalla táctil	Costo
Disponibilidad de los datos en tiempo real	
Visualización de todas las variables físicas (Temperatura, humedad, luminosidad y CO ₂)	

Objetivo

- Visualización de todos los datos recopilados por el módulo de sensores.

Entradas

²⁸ Shield: Placa de circuitos modulares que se montan unas encima de otras para dar funcionalidad extra a un unidad de procesamiento (Arduino)

- Los datos que provienen de todos los módulos que establecen el sistema de adquisición.

Salidas

- Los datos que provienen de todos los módulos del sistema de adquisición.

Para este módulo se eligió la pantalla marca nextion la cual es una solución Human Machine Interface (HMI) que proporciona una interfaz de control y visualización entre humano, máquina y un proceso. Este tipo de pantallas utiliza un puerto serie para hacer la comunicación, también cuenta con un editor de componentes masivos tales como botones, texto, barra de progreso, slider, panel de instrumentos y así enriquecer el diseño de su interfaz. Algunas de sus características son la resolución de 320 x 240, un panel resistivo táctil, memoria flash de 4 MB para código de usuario, aplicaciones y un consumo de energía de 5 v-65 mA.

3.3.6 Unidad central de procesamiento.

Por último la unidad más importante del sistema en general, la encargada de registrar, controlar y adquirir toda la información proveniente de los diferentes módulos, los cuales están interconectados a ella. Básicamente la unidad central de procesamiento es la que tomara las decisiones ante instrucciones. En la tabla 3.8 se muestra los requerimientos y restricciones para la unidad central de procesamiento.

Tabla 3.8 Requerimientos y restricciones para la unidad central de procesamiento.

Requerimientos	Restricciones
Reloj interno ≥ 16 MHz	Costo
Tensión de alimentación 5v	
Tensión de entrada 5v	
Pines digitales de entrada/salida	
Canales de entrada analógica	
Corriente DC en pines 5v-40 mA	
Corriente DC en pin 3.3V-50 mA	
Memoria Flash ≥ 32 KB	
RAM ≥ 64 MB	
Conexión a internet vía WIFI o Ethernet	
Memoria flash ≥ 16 MB	

Objetivo

- Procesar, registrar, adquirir y controlar toda la información proveniente de todos los módulos que conforman el sistema de adquisición de datos.

Entradas

- Las señales de datos que provienen de todos los módulos que establecen el sistema de adquisición.

Salidas

- Señales de control hacia todos los módulos del sistema de adquisición de datos.

La placa de desarrollo seleccionada fue la de un arduino Mega, el cual posee las siguientes características, el microcontrolador tiene una velocidad de reloj de 16 MHz, posee 54 pines digitales y 16 analógicos, memoria flash de 256 KB y una memoria SRAM de 8 KB.

3.4 Descripción del modelo de software.

El modelo a utilizar es el de cascada, a veces llamado ciclo de vida clásico, sugiere un enfoque sistemático y secuencial para el desarrollo del software, comienza con la especificación de los requerimientos del problema y avanza a través de planeación, modelado, construcción y despliegue, para concluir con el apoyo del software terminado. En la figura 3.2 se contempla la secuencia que se implementó en la ejecución del proyecto. [\[14\]](#)

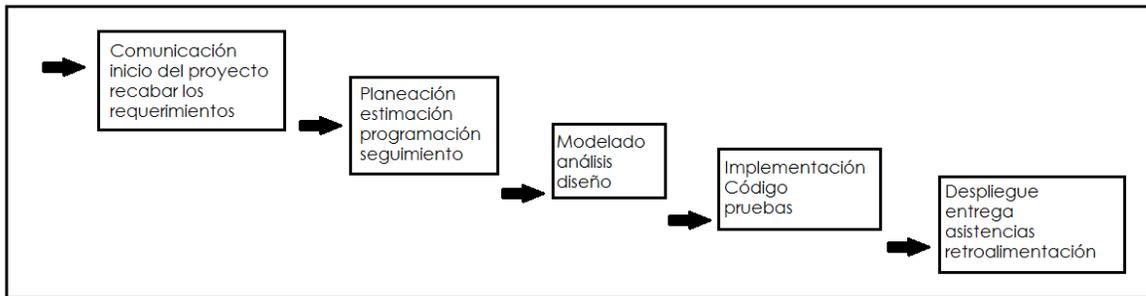


Figura 3.2 Modelo en cascada, adaptado de [14].

Como el software es siempre parte de un sistema mayor, el trabajo comienza estableciendo los requisitos de todos los elementos del sistema y luego asignando algún subconjunto de estos requisitos del software. Luego de eso sigue la planificación del proyecto, desarrollando un cronograma de tareas para llevar un orden específico. El modelado del sistema es primordial para saber que variables se deben controlar, seguidamente se busca el hardware que cumpla con las tareas necesarias para desarrollar el control del ambiente, luego una vez generado el código comienza la prueba del programa, esto se lleva a cabo realizando pruebas que aseguren que la entrada definida produzca los resultados que realmente se requieren.

3.5 Descripción del algoritmo de control del sistema de ambiente controlado.

En esta sección se demostrara como es el desarrollo de software, brindando un panorama general de las rutinas de software utilizadas para hacer uno del hardware, de esta forma se lograra implementar el sistema de ambiente controlado. El lenguaje que utiliza este tipo de plataformas es de alto nivel y equivalente a C++, en este tipo de dispositivos se logra ejecutar el algoritmo de control del sistema de adquisición de datos, donde el código de desarrollo se compilo en el IDE que suministra el fabricante.

3.5.1 Algoritmo de control para el sistema de ambiente controlado.

En la figura 3.3 se muestra como es el proceso que se empieza a ejecutar desde el encendido del sistema, en ese momento la secuencia del software realiza la organización general utilizada

para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación, en la figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo para dicho algoritmo.

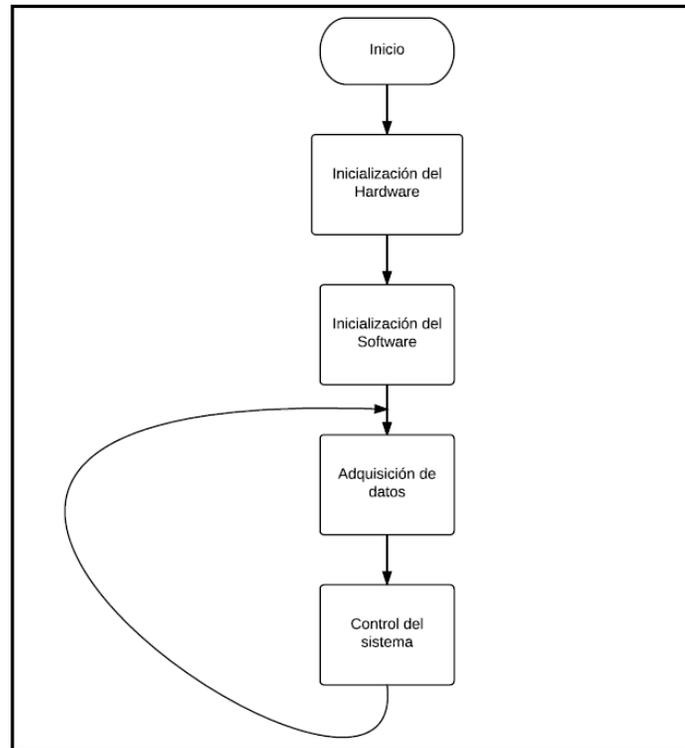


Figura 3.3 Diagrama de flujo para el algoritmo de control del sistema de ambiente controlado.

En la figura anterior se presenta el algoritmo inicial del sistema, en el cual ejecutara la inicialización en su totalidad del hardware, luego de eso se hará la inicialización del software mediante el uso de librerías, clases, variables globales y constantes.

Por medio del software se habilitara los protocolos de comunicación, así mismo la lectura de todo el hardware, almacenamiento de información y control del sistema de ambiente controlado.

3.5.2 Algoritmo para inicialización de hardware.

La estructura del algoritmo de inicialización del hardware se presenta en la figura 3.4 la cual tendrá como función específica encender todos los dispositivos conectados a la unidad central

de procesamiento, primero se encenderá esa unidad y a su vez en un estilo de cadena se procederá a iniciar cada uno de los módulos que conforman el sistema de ambiente controlado.

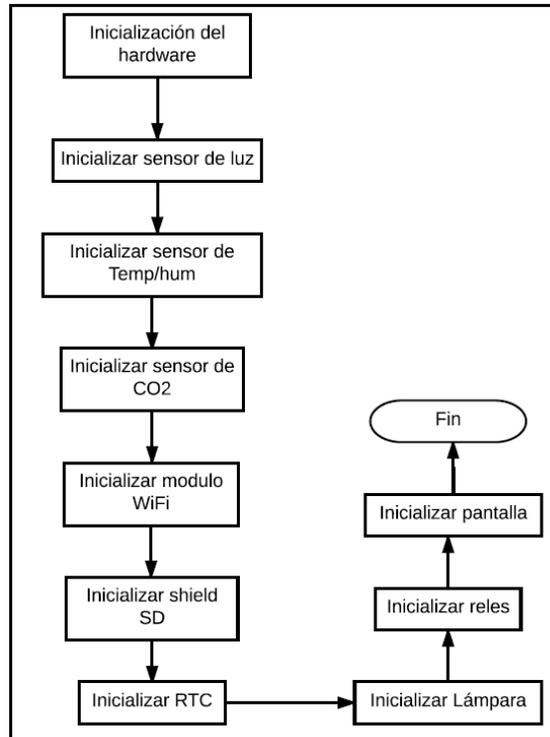


Figura 3.4 Diagrama de flujo para el algoritmo de inicialización de hardware.

3.5.3 Algoritmo para adquisición de datos.

El algoritmo para la adquisición de datos, se muestra en la figura 3.5, que tiene como función adquirir cada una de las variables que se presentan dentro del ambiente controlado, por lo que va leyendo cada valor obtenido de cada sensor por separado, luego de realizar la lectura de los cuatro sensores los almacena en caso de que no ocurra algún error en el proceso.

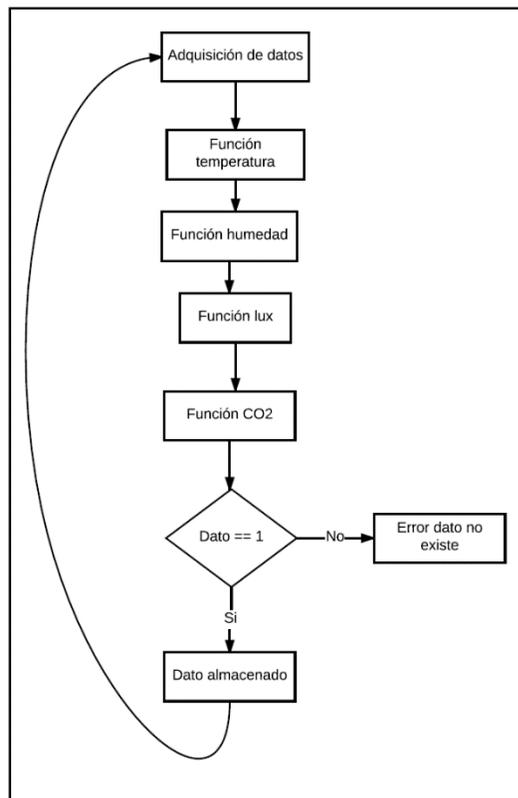


Figura 3.5 Diagrama de flujo para el algoritmo de adquisición de datos.

3.5.4 Algoritmo para almacenamiento de datos.

En la figura 3.6 se muestra el algoritmo para el almacenamiento de los datos, se necesita una microSD en la cual guardaremos la información obtenida del sistema de ambiente controlado. El algoritmo revisará si hay o no memoria flash, en caso de que no esté, volverá a la inicialización SD y se quedará recorriendo ese lazo hasta que se introduzca la memoria. En caso de que sea

correcta la inicialización se enviará un mensaje de “tarjeta SD Ok” el cual dará inicio al proceso, de esta forma se crea el archivo logTemp.txt dicho documento será en donde se almacenara cada uno de los datos recopilados del sistema. Se muestra como es la creación del dato String²⁹ que se está almacenando, el dato se almacena cada 60 segundos y si su creación se genera correctamente se podrá abrir el archivo logTemp.txt si no, se produce un error a la hora de abrirlo. En la siguiente figura se muestra como es la configuración de dicho algoritmo, tomando como ejemplo el dato de la temperatura, ya que para los demás son iguales a este.

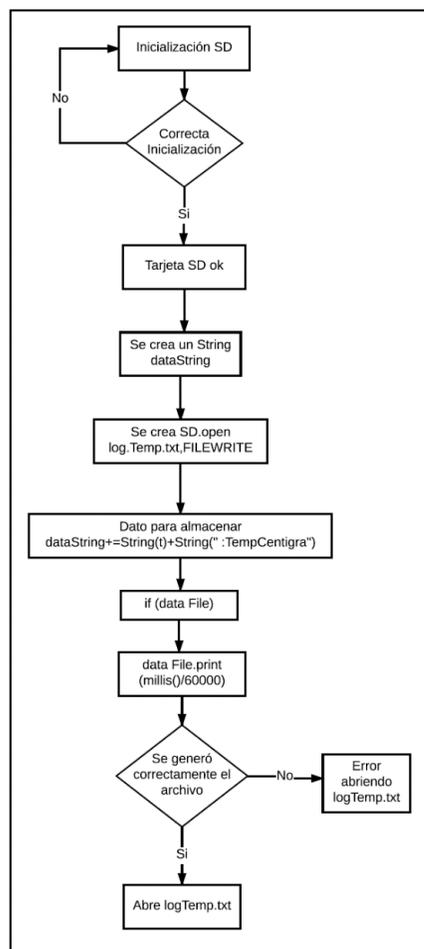


Figura 3.6 Diagrama de flujo para el algoritmo para el almacenamiento de datos.

²⁹ String: Es un tipo de dato inmutable, lo que significa que una vez que se ha creado se puede cambiar su valor.

3.5.5 Algoritmo para el control de las variables físicas.

Para el control de las cuatro variables que se controlan dentro del prototipo de ambiente controlado, se debe generar el algoritmo respectivo para su funcionamiento, en la siguiente sección se presentan como es la conformación de los mismos.

➤ Control de la temperatura

En la figura 3.7 se muestra como es el control de la temperatura.

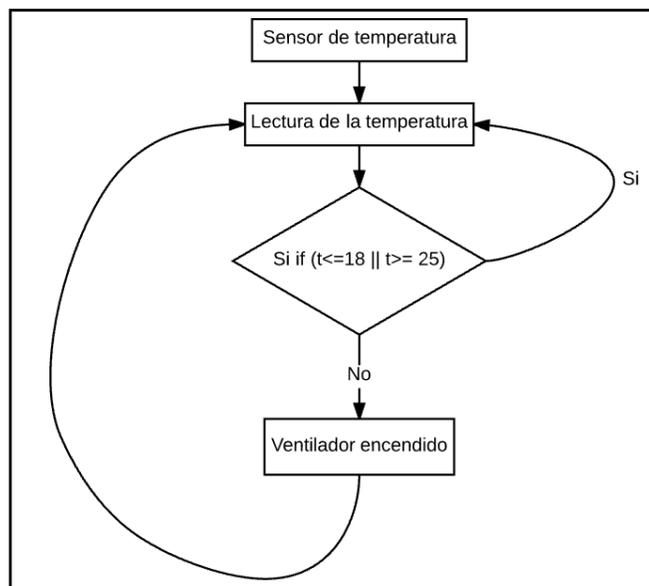


Figura 3.7 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de la temperatura.

En la tabla 2.2.1 se muestra las condiciones en las que puede vivir una planta de lechuga, pero según la literatura una temperatura adecuada para el crecimiento óptimo, debe estar entre los 18 a 25 grados centígrados. Por eso, en el control de la temperatura se muestra esos dos parámetros como base del control, ya que si la temperatura excede los 25 °C el ventilador se encenderá produciendo una corriente de viento dentro de la caja y de esta forma se enfriará el mismo.

➤ **Control de la humedad**

En la figura 3.8 se muestra como es el control de la humedad.

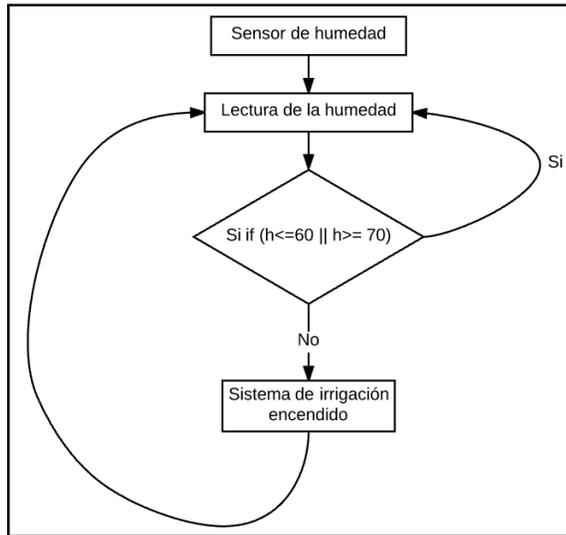


Figura 3.8 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de la humedad.

Igual que la temperatura todas las variables deben de estar lo más estables posibles, la más difícil de controlar es la humedad ya que si en el ambiente hay mucha produce que la planta se pudra, por lo que la producción no se desarrollaría. La humedad del ambiente según la tabla 2.2.1 debería de estar en un 90 % la cual es bastante alta, pero con un valor entre los 60 y 70 % de humedad relativa, se logra una condición ideal para su desarrollo.

➤ **Control de la luminosidad**

En la figura 3.9 se muestra como es el control de la luminosidad.

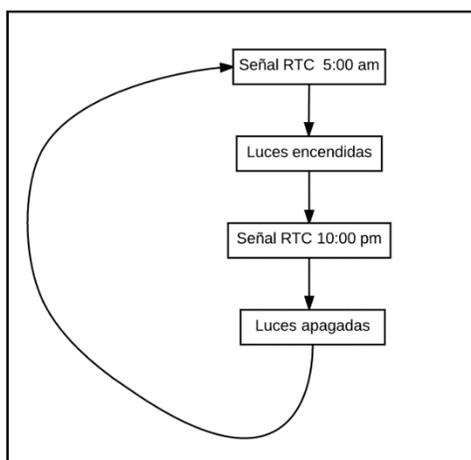


Figura 3.9 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de la luminosidad.

Para este caso las luces deben ser encendidas por un período de 16 horas, con la longitud de onda alrededor de 630 y 475 nanómetros. Conociendo que la luz es el factor principal para el desarrollo y salud de las plantas, ya que mediante la luz realizan la fotosíntesis que les permite crear el alimento necesario para su organismo.

➤ **Control del dióxido de carbono**

En la figura 3.10 se muestra como es el control del dióxido de carbono.

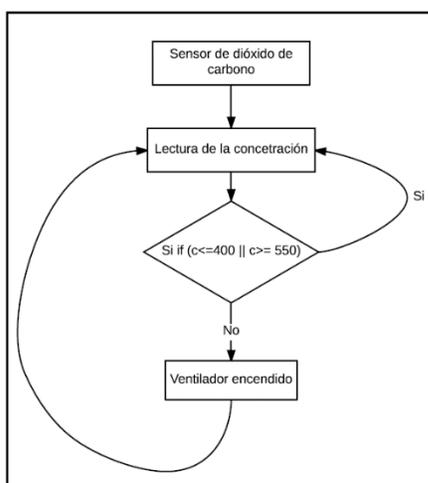


Figura 3.10 Diagrama de flujo para el algoritmo de control de dióxido de carbono.

Con el dióxido de carbono lo ideal es que no supere los 800 ppm con objeto de evitar la posibilidad de estresar a la planta, podría quemar las puntas y ennegrecer el cultivo. Cuando la humedad en la caja es alta, se recomienda reducir la concentración de CO₂ para evitar que las estomas se cierren, en cuyo caso se restringiría el transporte de agua y calcio a través de las plantas. Hay que tener presente que una concentración óptima de CO₂ tendrá un efecto positivo en desarrollo de la planta y vigor en general.

3.5.6 Algoritmo para envío de datos vía WiFi.

Para el envío de datos con la plataforma abierta de aplicaciones llamada Thingspeak, se diseñó un diagrama de flujo. Con él se logra seguir la secuencia que se necesita para el envío constante de las variables físicas que se están presentando dentro de la caja. Primero, se realiza la inicialización del puerto serie, con una velocidad de envío de 115200 baudios; luego de eso se produce el envío del comando AT desde el microcontrolador a el módulo WiFi, esperando la respuesta del módulo la cual debería de ser un OK, si no se obtiene esa respuesta el programa, vuelve a la inicialización que ya anteriormente había hecho. Si la respuesta es afirmativa se inicia con la conexión TCP³⁰, para esto se necesita el IP³¹ de la plataforma con la cual se va a enlazar, una vez realizado eso, se habilita el puerto con el cual se van a hacer el envío de datos. Seguidamente se crea la conexión, en caso de que esto no suceda se regresa a la sección de crear nuevamente la conexión TCP; para el caso afirmativo se crea el dato que se va a enviar. Ese dato que se envía es la lectura del sensor en tiempo real, para esto debemos saber el tamaño y la cantidad de datos que son, luego de eso se produce el envío hacia la plataforma y en caso negativo se regresa a volver a crear de nuevo la conexión. En la figura 3.11 se presenta

³⁰ TCP: Protocolo de Control de Transmisión

³¹ IP: Protocolo de Internet el cual es un número que identifica un dispositivo en una red.

la secuencia de dicho algoritmo, tomando como ejemplo el dato de la temperatura, considerando que para los demás datos se sigue la misma secuencia respectivamente.

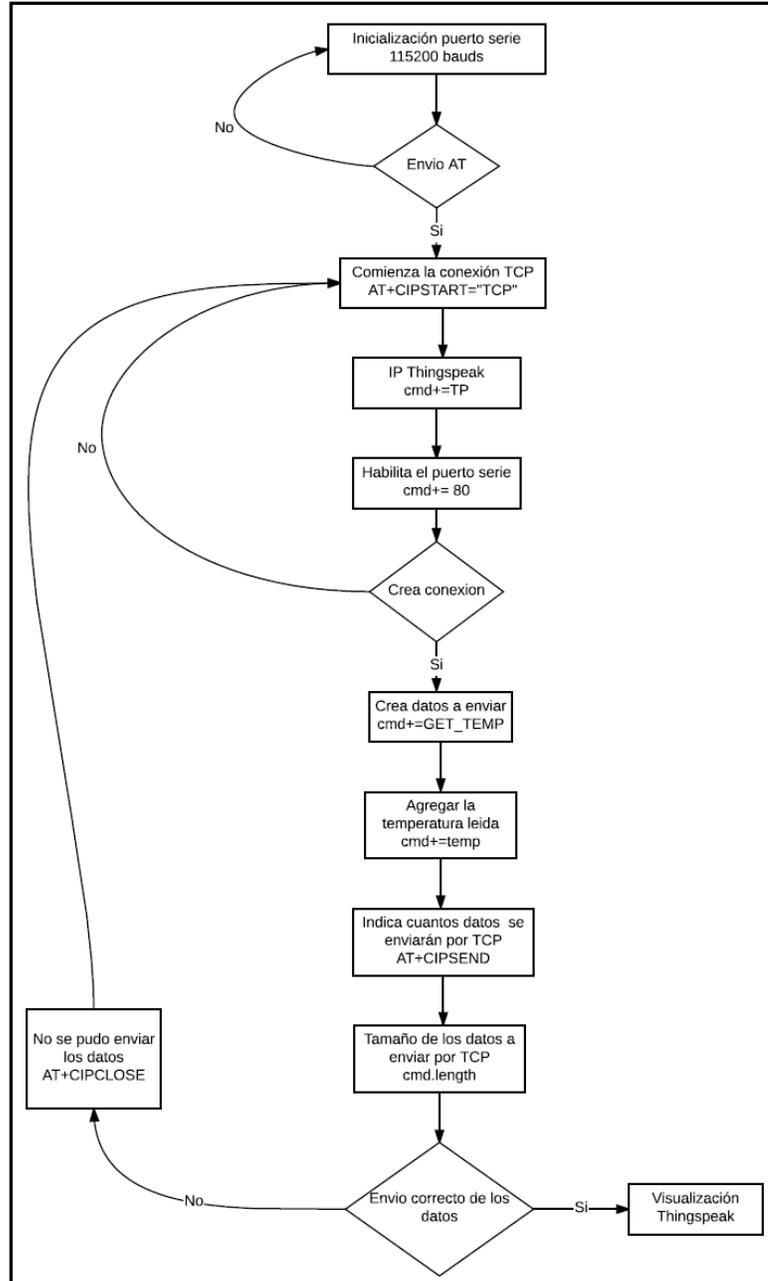


Figura 3.11 Diagrama de flujo para el algoritmo de envío de datos vía WiFi.

Capítulo 4: Validación y análisis

En el presente capítulo se mostraran las respectivas validaciones de los diferentes escenarios que se podrían someter todos los módulos que conforman al prototipo del sistema de ambiente controlado. Para realizar dicha validación se utilizaron diferentes referencias con las cuales se logró comprobar el funcionamiento adecuado de cada uno de los módulos por separado, y por último se validó el funcionamiento de todo el sistema integrado del ambiente controlado.

4.1 Resultados para el módulo de sensores

El módulo de sensores está compuesto por el sensor de temperatura, humedad, dióxido de carbono y luminosidad. La validación se realizó a cada sensor por separado, utilizando referencias que comprobaran la funcionabilidad de cada dispositivo.

4.1.1 Sensor de temperatura

Para la validación del sensor de temperatura, se utilizó como referencia la información que brinda la página web de una estación automática del Instituto Meteorológico Nacional ubicada en la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica. En esta estación brinda diferentes informaciones meteorológicas cada 2 minutos, en este caso solo utilizaremos el valor de temperatura. En la figura 4.1 se muestra la información que ofrece dicha página web.



Figura 4.1 Condiciones meteorológicas para la estación de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica, dato temperatura, tomado de [28].

Como se observa en la figura 4.1 la temperatura actual de la estación es de 23,4 grados centígrados, este valor será utilizado como referencia para realizar la validación del sensor de temperatura. Para realizar el respectivo análisis de los datos se decide obtener 5 muestras del sensor y así calcular el promedio. En la tabla 4.1 se presentan las 5 muestras obtenidas y su debido promedio.

Tabla 4.1. Muestras recolectadas del sensor de temperatura.

Muestra	Valor experimental (°C)
1	23,8
2	23,9
3	23,9
4	23,8
5	23,8
Promedio	23,84

Luego de haber obtenido el promedio para 5 muestras (fórmula 2, apéndice 3), se calcula el porcentaje de error según el valor de referencia obtenido, este valor se calculó según la fórmula 1 del anexo número 3.

Tabla 4.2 Porcentaje de error del sensor de temperatura, según el valor de referencia.

Valor de referencia (°C)	Valor experimental promedio (°C)	% Error
23,4	23,84	1,88

Con esto se puede comprobar la funcionabilidad del sensor de temperatura comparado con un valor de referencia. Según el fabricante posee una precisión de ± 0.5 a $\pm 1^\circ\text{C}$, en nuestro caso está sobrepasando ese rango.

4.1.2 Sensor de humedad

Para el sensor de humedad se utilizó la misma página web que se usó de referencia para el sensor de temperatura.



Figura 4.2 Condiciones meteorológicas para la estación de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica, dato humedad, tomado de [28].

En la figura 4.2 se observa la humedad actual de la estación es de 61%, este valor será utilizado como referencia para realizar la validación del sensor de humedad. Para realizar el respectivo análisis de los datos se decide obtener 5 muestras del sensor y así calcular el promedio. En la siguiente tabla se presentan las 5 muestras obtenidas y su debido promedio.

Tabla 4.3 Muestras recolectadas del sensor de humedad.

Muestra	Valor experimental (%)
1	56,0
2	55,90
3	56,0
4	56,10
5	56,0
Promedio	56

Tabla 4.4 Porcentaje de error del sensor de humedad, según el valor de referencia.

Valor de referencia (%)	Valor experimental promedio (%)	% Error
61	56	8,19

Después de seguir el mismo procedimiento que se siguió en la sección anterior, se obtiene el porcentaje de error del respectivo sensor, el cual es un poco elevado, según el fabricante su precisión es alrededor de $\pm 2\%$ a una temperatura de 25 °C.

4.1.3 Sensor de luminosidad

Para la validación del sensor de luminosidad, se utilizó la luz neo pixel para comprobar su funcionalidad, esta luz está compuesta por 60 leds tipo WS2812 [24]. En la tabla 4.5 se presentan las características más relativas para la luz roja, verde y azul. Hay que tomar en cuenta que este rango de parámetros es obtenido con una distancia entre sensor y la luz de 50 centímetro con un ángulo de incidencia de 90°.

Tabla 4.5 Parámetros característicos para la luz roja, verde y azul, tomada de [24].

Tipo de Luz	Longitud de onda (nm)	Intensidad luminosa (mcd)	Intensidad luminosa (Lux)
Rojo	620-625	550-700	2.22-2.81
Verde	522-525	1100-1400	4.42-5.61
Azul	465-467	200-400	0.81-1.61

Estos valores serán los de referencia que se compararán con los datos obtenidos del sensor de luz. Para esto se toman 5 muestras de cada tipo de luz y se saca el promedio respectivo, dicha información está en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Muestras recolectadas del sensor de luminosidad.

Muestra	Valor experimental Roja (Lux)	Valor experimental Verde (Lux)	Valor experimental Azul (Lux)
1	2	4	1
2	2	4	1
3	2	4	1
4	2	4	1
5	2	4	1
Promedio	2	4	1

Para obtener el porcentaje de error por medio de la fórmula 1 (Ver apéndice 3), se utilizó el valor menor del rango que da el fabricante como referencia, por lo cual en la tabla 4.7 está calculado para los tres tipos de luz.

Tabla 4.7 Porcentaje de error del sensor de luminosidad, según el valor de referencia.

Tipo de luz	Valor de referencia (Lux)	Valor experimental promedio (Lux)	% Error
Roja	2.22	2	9.90
Verde	4.42	4	9.50
Azul	0.81	1	23.45

El porcentaje de error es bastante elevado, con respecto a lo que dice el fabricante, de esta manera se decide a realizar otra prueba, esta vez con un bombillo tipo led comercial, que cuenta con las siguientes características.

Tabla 4.8 Características de un bombillo comercial según el fabricante.

Tipo de luz	Intensidad luminosa (lux)	Tensión (V~)
Led comercial	565,13	110

Utilizamos ese valor como el de referencia y lo comparamos con el que se obtiene experimentalmente, en la siguiente tabla se muestra el resultado.

Tabla 4.9 Porcentaje de error del sensor de luminosidad, según el valor de referencia.

Tipo de luz	Valor de referencia (Lux)	Valor experimental promedio (Lux)	% Error
Comercial	565,13	569	0.68

Para esta medición el porcentaje de error es menor, un factor a considerar, es la diferencia de potencia que posee cada dispositivo, ya que un led aproximadamente trabaja con 0.3 watts y la lámpara comercial con 5 watts.

4.1.4 Sensor de dióxido de carbono

Para la validación del sensor de dióxido de carbono se utilizó el valor de referencia que brinda la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la concentración atmosférica típica esta entre 350 a 450 ppm, pero para el 2015 se llegó al valor de 400 ppm. Para realizar el respectivo análisis de los datos se realiza el mismo procedimiento que se usó para los demás sensores, la cual fue

obtener 5 muestras del sensor y así calcular el promedio. En la tabla 4.10 se presentan las 5 muestras obtenidas y su debido promedio.

Tabla 4.10 Muestras recolectadas del sensor de dióxido de carbono CO₂.

Muestra	Valor experimental (ppm)
1	405
2	410
3	409
4	403
5	405
Promedio	406,4

Luego de haber obtenido el promedio para 5 muestras (según fórmula 2, apéndice 3), se calcula el porcentaje de error según el valor de referencia obtenido, este valor se calculó según la fórmula 1 del anexo número 3. En la tabla 4.11 se encuentra el porcentaje de error del sensor de dióxido de carbono.

Tabla 4.11 Porcentaje de error del sensor de dióxido de carbono, según el valor de referencia.

Valor de referencia (%)	Valor experimental promedio (%)	% Error
400	406,4	1,6

Con esto se puede comprobar la funcionabilidad del sensor de dióxido de carbono comparado con un valor de referencia. En la tabla 4.12 se muestra el cumplimiento de los requerimientos y de las restricciones para el módulo de sensores que se utilizaron para crear el prototipo de ambiente controlado.

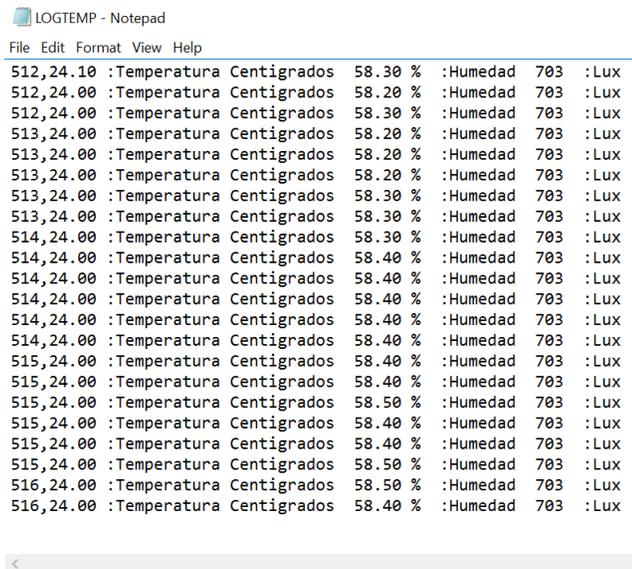
Tabla 4.12 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de sensores.

Requerimientos	Cumple especificaciones?	Restricciones	Cumple especificaciones?
Humedad	Si	Costo	Si
Temperatura	Si		
Luminosidad	Si		
Dióxido de carbono	Si		
Precisión	Si		

4.2 Resultados para el módulo de almacenamiento de información.

En este apartado lo que se realiza la comunicación de la unidad central de procesamiento con el módulo de almacenamiento de información, el cual utiliza el protocolo de comunicación SPI, para esto se utilizó una tarjeta microSD de 8 GB en la cual se almacenaran los datos obtenidos. Se crea un archivo con los valores recopilados del ambiente controlado llamado LOGTEMP.

En la siguiente figura se muestran los datos recopilados por el sistema de adquisición de datos, los mismos son guardados en la tarjeta microSD. El número que se muestra al inicio es el número de muestra, el siguiente es el valor de la temperatura, luego el de la humedad relativa y por último el valor de los lux.



```
LOGTEMP - Notepad
File Edit Format View Help
512,24.10 :Temperatura Centigrados 58.30 % :Humedad 703 :Lux
512,24.00 :Temperatura Centigrados 58.20 % :Humedad 703 :Lux
512,24.00 :Temperatura Centigrados 58.30 % :Humedad 703 :Lux
513,24.00 :Temperatura Centigrados 58.20 % :Humedad 703 :Lux
513,24.00 :Temperatura Centigrados 58.20 % :Humedad 703 :Lux
513,24.00 :Temperatura Centigrados 58.20 % :Humedad 703 :Lux
513,24.00 :Temperatura Centigrados 58.30 % :Humedad 703 :Lux
513,24.00 :Temperatura Centigrados 58.30 % :Humedad 703 :Lux
514,24.00 :Temperatura Centigrados 58.40 % :Humedad 703 :Lux
515,24.00 :Temperatura Centigrados 58.40 % :Humedad 703 :Lux
515,24.00 :Temperatura Centigrados 58.40 % :Humedad 703 :Lux
515,24.00 :Temperatura Centigrados 58.50 % :Humedad 703 :Lux
515,24.00 :Temperatura Centigrados 58.40 % :Humedad 703 :Lux
515,24.00 :Temperatura Centigrados 58.40 % :Humedad 703 :Lux
515,24.00 :Temperatura Centigrados 58.50 % :Humedad 703 :Lux
516,24.00 :Temperatura Centigrados 58.50 % :Humedad 703 :Lux
516,24.00 :Temperatura Centigrados 58.40 % :Humedad 703 :Lux
```

Figura 4.3 Formato txt para el almacenamiento de la información.

En la tabla 4.13 se muestra el cumplimiento de requerimientos y restricciones planteados para el módulo de almacenamiento de información.

Tabla 4.13 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de almacenamiento de información.

Requerimientos	Cumple con las especificaciones ?	Restricciones	Cumple con las especificaciones ?
Capacidad de memoria mayor a 64 GB	Si	Costo	Si
Compatible con una SD	Si		
Protocolo de comunicación	Si		

4.3 Resultados para el módulo de interfaz de usuario.

El módulo de interfaz de usuario permite ver los datos que se tienen en tiempo real, con un delay alrededor de 1000 milisegundos, dentro del prototipo del sistema de ambiente controlado. De esta manera el usuario podrá ver las condiciones físicas que se le están brindando a la planta. En la figura 4.4 se visualiza las diferentes interfaces gráficas que contiene este módulo, la primera, es la imagen de inicio la cual cuenta con un botón llamado Menú el cual al accionarlo accederá a la siguiente pantalla.



Figura 4.4 Visualización del menú en el módulo de interfaz de usuario.

El cultivo con el cual se está experimentando es la lechuga, pero la idea es llevarlo más allá y producir gran variedad de cultivos, por eso en la siguiente figura 4.5 aparecen más productos, como el culantro, la rucula, espinaca, cebada y tomate cherry. Cada casilla es un botón con el cual accedemos a las condiciones idóneas de cada producto.



Figura 4.5 Menú del sistema.

En la figura 4.6 se visualizan las condiciones físicas que se están desarrollando dentro del sistema de ambiente controlado, podemos ver que están las cuatro variables a controlar, más un botón de información en el cual nos brinda los datos necesarios que debemos saber sobre este particular producto agrícola.



Figura 4.6 Variables físicas dentro del sistema de ambiente controlado.

Ciclo de madurez	40 a 60 días
Tipo Fotosintético	C3 ¹
Fotoperiodo	Se considera una planta de día neutro o corto
Radiación (Luz)	Requiere condiciones intermedias de insolación
Temperatura diurna (°C)	14 a 18
Temperatura Nocturna (°C)	5 a 8
Humedad (%)	90
Precipitación (mm)	1000 a 1200

Figura 4.7 Información básica acerca de la lechuga, tomada de [3].

En la tabla 4.14 se muestra el cumplimiento de requerimientos y restricciones planteados para el modulo de interfaz de usuario.

Tabla 4.14 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de interfaz de usuario.

Requerimientos	Cumple con las especificaciones ?	Restricciones	Cumple con las especificaciones?
Contar con una pantalla táctil	Si	Costo	Si
Disponibilidad de los datos en tiempo real	Si		
Visualización de todas las variables físicas (Temperatura, humedad, luminosidad y CO ₂)	Si		

4.4 Resultados para el módulo de comunicación por internet.

La visualización de los datos obtenidos en tiempo real del sistema de ambiente controlado se presenta en la figura 4.8, esto se hace mediante una conexión WiFi para realizar la comunicación y utilizando el módulo ESP8266.

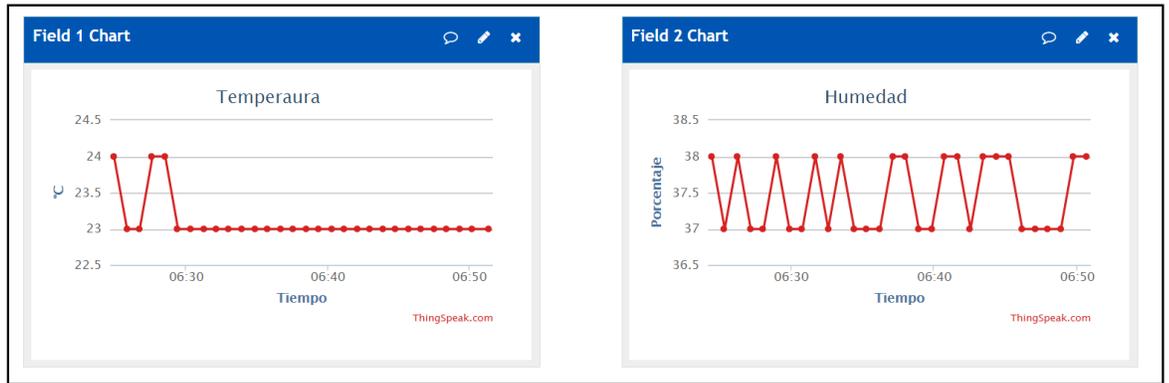


Figura 4.8 Visualización en la plataforma Thingspeak.

La versatilidad que ofrece este tipo de plataformas es que brindan diferentes soluciones para el usuario, dentro de las que se encuentran aplicaciones para dispositivos móviles donde se descargan sin costo alguno, y así poder observar las variables monitorizadas en la figura 4.9 se muestra como es la visualización desde un móvil.

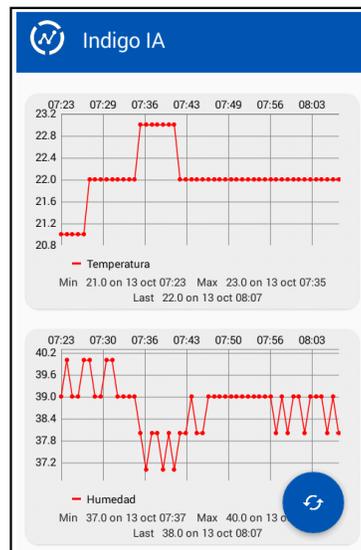


Figura 4.9 Visualización en la aplicación para móviles de la plataforma Thingspeak.

Para este módulo se debió de tomar en cuenta varios requerimientos y restricciones, en la tabla 4.15 se muestra la especificación de cuales eran y su cumplimiento respectivo.

Tabla 4.15 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de comunicación por internet.

Requerimientos	Cumple con las especificaciones ?	Restricciones	Cumple con las especificaciones?
Conexión con una tasa de transferencia alta	Si	Costo	Si
Envío constante de datos	Si		
Contar al menos con conexión vía WiFi o Ethernet	Si		

4.5 Resultados para el módulo reloj en tiempo real.

La función que cumple este módulo es brindar la información de la hora y fecha del RTC a la unidad de procesamiento principal, el dato debe ser bastante preciso. La validación correspondiente para este módulo se hizo mediante la comprobación del funcionamiento de las dos señales que conforman el protocolo de comunicación I²C, en las siguientes figuras se muestran las señales de SDA y SCL que se obtuvieron mediante el osciloscopio.

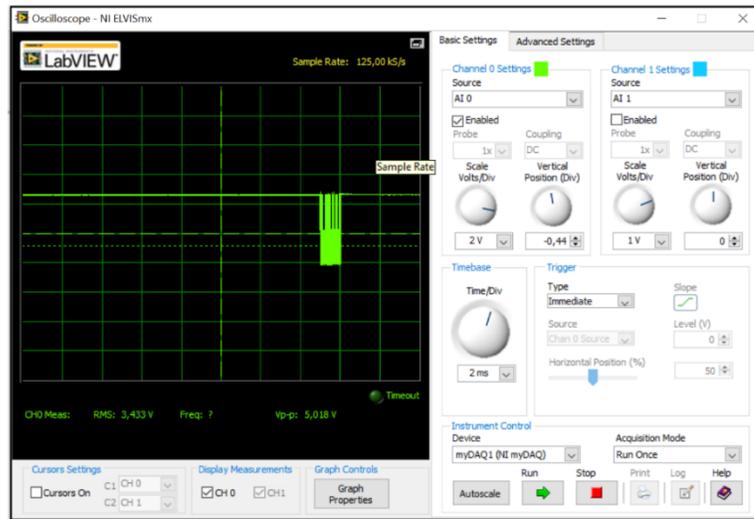


Figura 4.10 Visualización en el osciloscopio de la señal serial data (SDA) para el módulo del RTC.

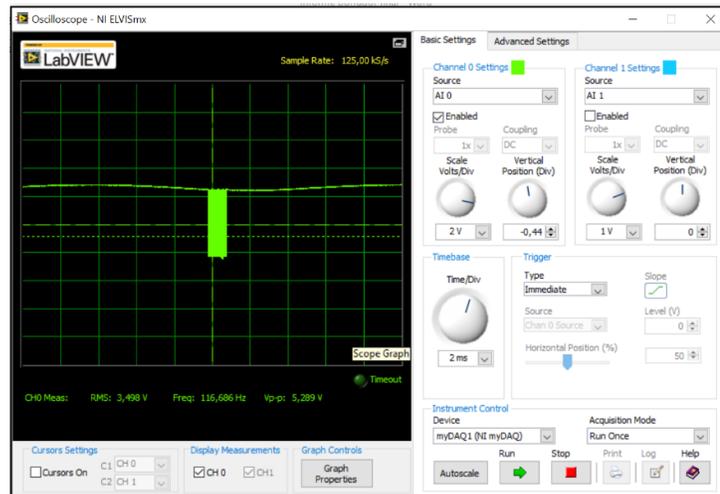
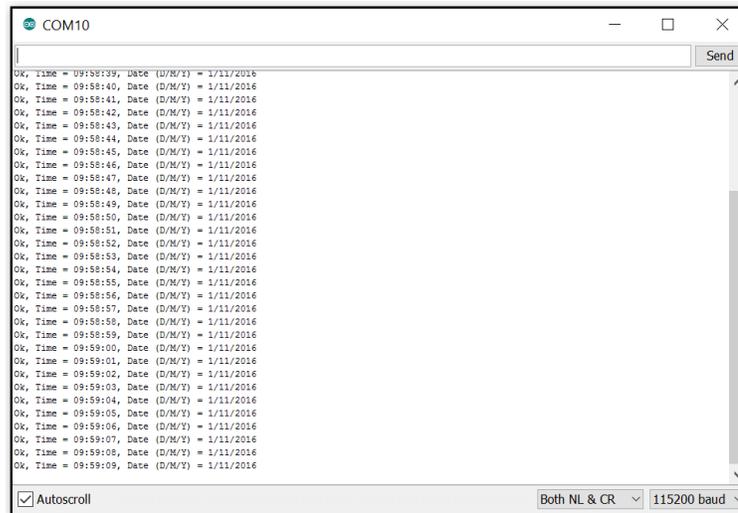


Figura 4.11 Visualización en el osciloscopio de la señal serial clock (SCL) para el módulo del RTC.

Para hacer uso correcto del módulo se utilizó una librería de github³² llamada DS1307RTC³³ la cual contiene el ReadTest³⁴, de esta manera se logró comprobar un funcionamiento correcto. Con esta librería se logra sincronizar el módulo con el reloj actual de la computadora, por lo que de esa forma se obtiene una lectura correcta, en la siguiente imagen se muestra el tiempo (Time) y la fecha (Date) de la prueba.



```
COM10
OK, Time = 09:58:39, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:40, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:41, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:42, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:43, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:44, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:45, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:46, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:47, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:48, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:49, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:50, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:51, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:52, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:53, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:54, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:55, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:56, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:57, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:58, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:58:59, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:00, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:01, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:02, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:03, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:04, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:05, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:06, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:07, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:08, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
OK, Time = 09:59:09, Date (D/M/Y) = 1/11/2016
Autoscroll Both NL & CR 115200 baud
```

Figura 4.12 Visualización de la hora (Time) y la fecha (Date) del módulo RTC.

Seguidamente se hicieron dos pruebas para la comprobación del módulo, las cuales fueron desconectarlo de la alimentación por dos diferentes lapsos de tiempo para probar que tan eficiente es. Teniendo en cuenta que el dispositivo posee una batería externa la cual proporciona de alimentación el módulo, se logró comprobar la precisión del RTC el cual se mantenía funcionando de la forma deseada. Con respecto a la validación, en la tabla 4.16 se muestran los requerimientos y restricciones que se debían cumplir para el funcionamiento deseado.

³² *Github*: Es una plataforma de desarrollo colaborativo de software para alojar proyectos utilizando el sistema de control de versiones Git.

³³ *DS1307RTC*: Librería que se encuentra en la plataforma Github.

³⁴ *ReadTest*: Código de ejemplo que trae la librería.

Tabla 4.16 Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el módulo de reloj en tiempo real.

Requerimientos	Cumple con las especificaciones ?	Restricciones	Cumple con las especificaciones?
Formato de hora, día, mes, año	Si	Costo	Si
Formato del reloj en segundos	Si		
Alta precisión, batería aparte	Si		

4.6 Resultados del crecimiento de la planta.

Para la validación del prototipo del ambiente controlado, se procedió a cultivar en una bandeja de almácigo 200 lechugas, de esta forma, se quería comprobar la funcionalidad del sistema, por lo que se introdujo la bandeja y el prototipo se encargó de proporcionarle las condiciones ideales al cultivo. En la figura 4.13 se muestra la bandeja ya cultivada.



Figura 4.13 Primera prueba con una bandeja de 200 unidades de lechuga.

Luego de tres días de haber plantado las lechugas se obtiene que la fase de germinación ha acabado para algunas plantas y empieza el crecimiento vegetativo de las mismas, no obstante no todas las semillas han terminado esa etapa, lo cual indica que existe algún problema en el desarrollo. En la figura 4.14 se muestra la evolución de algunas plantas.

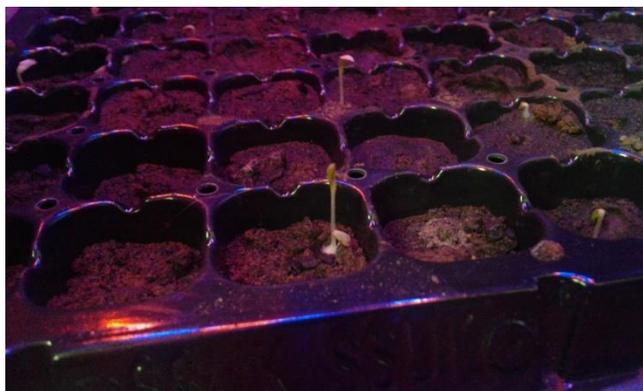


Figura 4.14 Crecimiento de las lechugas después de 3 días de haberse plantado.

Luego de 8 días dentro del prototipo de ambiente controlado las plantas finalmente han acabado con el proceso de germinación y ya se empieza a ver su crecimiento vegetativo, pero ocurre un fenómeno extraño el cual es, que las plantas se están haciendo altas y muy delgadas lo que comúnmente se conoce como patonas³⁵. Este problema se debe a la cantidad de luz que se le está suministrando, la calidad de luz sí es la adecuada, pero faltan leds, por lo que las plantas presentan ese crecimiento tan peculiar. La solución del problema es aumentar el número de leds que se cuentan hasta ahora, por lo que se deben seguir haciendo pruebas del sistema hasta encontrar la cantidad de luz ideal. En la figura 4.15 se muestra el crecimiento que se obtuvo.



Figura 4.15 Crecimiento de las lechugas después de 8 días de haberse plantado.

³⁵ *Patonas*: Término que se utiliza para describir a las plantas cuando su crecimiento es alto y de tallo delgado.

4.7 Resultados del consumo de potencia del sistema.

Para realizar la validación del consumo de potencia, se toma en cuenta el modelo de la fuente de alimentación que se utilizó, la cual es Rexpower PX-400, con una potencia de 220 watts. Este valor generalmente es la máxima potencia a la cual el dispositivo funciona, ahora para hacer un estimado aproximado de los kWh a partir de ese valor, tomando en cuenta que el consumo real del prototipo podría ser menor. Como el sistema se encenderá a las 5 a.m. y se apagará a las 10 p.m. el consumo total por día será

$$220 \text{ watts} \times 17 \text{ horas} = 3740 \text{ Wh} = 3.74 \text{ kWh}$$

El consumo por día será de 3.74 kWh, tomando en cuenta que la factura de la electricidad se paga por mes, se multiplicara por 30 días los cuales son los que por general componen un mes, por lo que el valor será de

$$3.74 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \times \frac{30 \text{ dias}}{1 \text{ mes}} = 112.2 \text{ kWh}$$

Ahora el consumo de energía por mes será de 112.2 kWh, para calcular el monto en colones que se necesita para utilizar el prototipo de ambiente controlado, se toma como referencia el monto que da el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), para los primeros 200 kWh tienen un valor de ₡ 68 / kWh, de esta forma se procede a realizar el cálculo. [27]

$$112.2 \text{ kWh} \times \frac{₡ 68}{\text{kWh}} = ₡ 7629.6$$

Se obtiene que el costo por consumo de energía será de 7629.6 colones por mes.

Capítulo 5: Conclusiones

Por medio del uso de hardware y software se pudo implementar y validar mediante una prueba de concepto el prototipo del ambiente controlado para utilizar en hortalizas, específicamente en la lechuga. Dicha implementación del prototipo tuvo un costo aproximado en materiales de \$ 310 en comparación de un sistema comercial que ronda los \$ 10 876.

Con el uso de una metodología modular se desarrolló un concepto de diseño escalable para un sistema de ambiente controlado. De esta forma permite dividir un programa en módulos o subprogramas con el fin de hacerlo más legible y manejable.

Para el desarrollo del software se implementó el modelo en cascada, el cual sugiere un enfoque sistemático y secuencial. Esta metodología comienza con la planeación, el modelado, la construcción y el despliegue, para concluir con el software terminado.

El programa final que se encuentra en la unidad central de procesamiento consumió 27,926 bytes para un 10% de la capacidad total. De esta forma al utilizar esta plataforma de desarrollo permite la incorporación de mejoras a futuro y de poder expandir a más ambientes controlados.

Se logró demostrar a nivel del prototipo que el sistema de ambiente controlado realiza adecuadamente las siguientes funciones:

- Control adecuado de la temperatura según los requerimientos de la planta.
- Brindarle la humedad necesaria que requiere la legumbre para su crecimiento, sin permitir que exista una saturación excesiva.
- Aportarle a la planta la luz necesaria para desarrollar la fotosíntesis.
- Controlar la concentración de dióxido de carbono dentro el sistema, especialmente en las noches cuando el proceso de la fotosíntesis es inverso.

- Por medio de la pantalla táctil se proporciona una visualización entre un humano y el prototipo del sistema del ambiente controlado.
- Conexión del prototipo con el internet para la visualización del comportamiento de las variables físicas.

Otras conclusiones a considerar acerca de los ambientes controlados, el crecimiento de las plantas y generalidades de los dispositivos utilizados.

- La temperatura óptima para una planta depende de varios factores y uno de ellos es el estado de desarrollo de la misma, ya que las plantas tienen una especie de reloj biológico que determina su sensibilidad a la temperatura.
- La temperatura de la planta y la del ambiente no son iguales porque las plantas son capaces de enfriarse por evaporación y de calentarse por irradiación.
- El rango de medición de temperatura idónea para el crecimiento de la lechuga es de 18 °C a 25 °C con un porcentaje de error de 1.88%.
- Saturación excesiva de humedad puede producir un crecimiento débil, aumento de enfermedades de las hojas, deficiencia de nutrientes y bordes quemados.
- La humedad es el factor ambiental más difícil de controlar dentro del prototipo.
- Para la humedad el rango de medición en el cual es el adecuado para el crecimiento del vegetal es de 60 % a 70 % con un porcentaje de error de 8.19%.
- La luz tiene efectos múltiples en las semillas, tanto como su calidad y la intensidad afectan, según la especie, el proceso germinativo.

- Las semillas se clasifican según su necesidad de luz para germinar, pueden ser fotoblásticas positivas, negativas o neutras.
- La precisión del sensor de lux depende del ambiente en el cual se realicen las mediciones.
- La luz roja le sirve a la planta para saber lo que duran los días y las noches por la acción que ejercen sobre el fitocromo.
- En condiciones de oscuridad, el porcentaje de germinación es bajo, basta un pulso de luz roja para inducir la germinación.
- La combinación de la luz roja y azul favorecen a la floración.
- En el ambiente la concentración de dióxido de carbono es de 0.04%, si se logra aumentar a un 0.10% se duplicaría la tasa fotosintética.
- El sensor de dióxido de carbono cuando su temperatura interna aumenta su eficiencia es más precisa, de esta manera su porcentaje de error es de 1.6%.
- El proceso de la germinación se divide en tres fases, en las cuales las dos primeras el consumo de agua es escaso.
- Un exceso de agua reduce la disponibilidad de oxígeno para el embrión.
- Dependiendo de la clase de lechuga, así será el tiempo de crecimiento.
- El tamaño del dispositivo de almacenamiento se define dependiendo del tiempo con el que el sistema obtenga cada muestra.

- EL módulo ESP8266 presenta las características de ser un dispositivo muy sencillo de utilizar, el cual presenta una comunicación serie y diferentes velocidades de envío de datos.

5.1 Recomendaciones

La utilización del sensor de dióxido de carbono genera complicaciones ya que su funcionamiento empieza luego de estar 48 horas conectado para su calibración, por lo cual demora bastante obtener lecturas correctas de la concentración que se encuentra en el ambiente.

Al almacenar las muestras en un archivo TXT se consume mucho más memoria que un archivo CSV, lo recomendable es cambiar el tipo de formato.

La cantidad de luces debe ser mayor a 60 Leds, por motivo de que con solo esa cantidad la planta presenta deficiencia en su crecimiento, de esta forma se recomienda utilizar aproximadamente 250 Leds distribuidos en luz roja y azul.

Las plantas como seres vivos necesitan de nutrientes que se encuentran en el medio ambiente tanto como en el aire, como en el suelo que sintetizan para su propio consumo, de esta forma se debería de suministrar un tipo de abono granulado para la germinación llamado 103010, el cual está constituido por nitrógeno, fósforo y potasio.

Al ser un sistema autónomo y teniendo en cuenta que las plantas deben contar con el suministro de luz constantemente se debería de implementar una batería la cual garantice que el sistema no presentará ausencia del suministro eléctrico.

Es importante realizar mediciones de la planta como su temperatura en la zona radicular, la conductividad eléctrica, los minerales y el grado de acidez (pH) para así tener un mejor control del crecimiento.

Para el crecimiento vegetativo y dependiendo de la técnica que se utilice en hidroponía habría que medir constantemente la temperatura del agua en caso de que las plantas se cultiven en sistemas inundados.

Bibliografía

- [1] Programa Nacional de Ambientes Protegidos (s. f.). Recuperado el 11 de Mayo del 2016, de http://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/estructura/oficinas/prog-nac-aprot.html
- [2] El concepto de Agricultura Protegida para el trópico latinoamericano (s. f.). Recuperado el 12 de Septiembre del 2016, de <http://www.mag.go.cr/informacion/prog-nac-aprot-1-conceptoAP-Taller-Sistemas-v1.pdf>
- [3] Requerimientos Agroecológicos de Cultivos. (s.f.). Recuperado el 11 de Mayo del 2016, de http://www.inifapcirpac.gob.mx/publicaciones_nuevas/Requerimientos%20Agroec%20de%20Cultivos%20da%20Edici%C3%B3n.pdf
- [4] R. A. E. G. y. V. J. Jorge Herrera, Germinación y crecimiento de la planta, San José : UCR, 2006
- [5] Etapa de Germinación (s. f.). Recuperado el 21 de Septiembre del 2016, de http://www7.uc.cl/sw_educ/cultivos/legumino/haba/germinac.htm
- [6] Valla, Juan J. (1979, 19ª reimpresión 2007). Botánica. Morfología de las plantas superiores. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- [7] Salisbury, F. & Ross, C. (s. f.). Fisiología Vegetal (Cuarta Edición ed.), Estados Unidos California 1992.
- [8] R. H. L. Saldivar, Fisiología Vegetal, México D.F: Trillas, S.A de C.V., 2007.
- [9] Electromagnetic spectrum-es.svg - Wikimedia Commons (s. f.). Recuperado el 08 de Octubre del 2016, de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg
- [10] A. P. Torres, Cultivo Ecológico de hortalizas, Bogotá, D.C: Lexus, 2010.
- [11] EL BUS I2C (s. f.). Recuperado el 23 de Septiembre del 2016, de <http://www.uco.es/~el1mofer/Docs/IntPerif/Bus%20I2C.pdf>
- [12] Puertos y Buses 1: I2C y UART? Geeky Theory (s. f.). Recuperado el 23 de Septiembre del 2016, de <https://geekytheory.com/puertos-y-buses-1-i2c-y-uart/>
- [13] Comandos AT (s. f.). Recuperado el 19 de Octubre del 2016, de <http://www.pridopia.co.uk/pi-doc/ESP8266ATCommandsSet.pdf>

[14] R. S. Pressman, Ingeniería del software un enfoque práctico, México D.F: McGrawHill, 2010.

[15] Sistemas controlados de producción agrícola (s. f.). Recuperado el 11 de Mayo del 2016, de <http://indigoia.com/ganaderia-pasto>

[16] Producción en Ambientes Protegidos y/o controlados (s. f.). Recuperado el 11 de Mayo del 2016, de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00098.pdf>

[17] U.S. Department of Agriculture (s. f.). Recuperado el 11 de Mayo del 2016, de <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>

[18] Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: Estructuras para la Agricultura Protegida (s. f.). Recuperado el 11 de Mayo del 2016, de <https://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/HS/HS118200.pdf>

[19] Cuantificación y Valoración de Estructuras y Procesos de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos en Costa Rica. (s. f.). Recuperado el 11 de Mayo del 2016, de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00290.pdf>

[20] Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030 (s. f.). Recuperado el 08 de Septiembre del 2016, de <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s11.htm>

[21] Hidroponía en casa (s. f.). Recuperado el 08 de Septiembre del 2016, de http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/Hidroponia.pdf

[22] Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola en Ambientes Protegidos (ProNAP) (s. f.). Recuperado el 12 de Septiembre del 2016, de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/pronap-intr.pdf>

[23] Programa Nacional de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos (s. f.). Recuperado el 12 de Septiembre del 2016, de http://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/estructura/oficinas/prog-nac-aprot.html

[24] Intelligent control LED integrated light source (s. f.). Recuperado el 14 de Octubre del 2016, de <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>

[25] ESP8266 WiFi Module Quick Start Guide (s. f.). Recuperado el 14 de Octubre del 2016, de [http://rancidbacon.com/files/kiwicon8/ESP8266 WiFi Module Quick Start Guide v 1.0.4.pdf](http://rancidbacon.com/files/kiwicon8/ESP8266%20WiFi%20Module%20Quick%20Start%20Guide%20v%201.0.4.pdf)

[26] Adafruit Assembled Data Logging shield for Arduino ID: 1141 Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits (s. f.). Recuperado el 18 de Octubre del 2016, de <https://www.adafruit.com/product/1141>

[27] Grupo ICE (s. f.). Recuperado el 02 de Noviembre del 2016, de http://www.grupoice.com/wps/portal/ICE/Electricidad/Ahorro%20de%20electricidad/lut/p/z1/jVDLCoJAFP2VWrjMO_ZS2g0RRSQUFdlSytJxHFCvjFNCX99Qq6DMuzuX8-IAgwhYye9KcqOw5LnFZza9-LuAeqsl2Sz91ZzQ8DClnr8YlsYjOLURwvUEWBc9-XGUdNO3EFi7_fpgF1gqMN5KIFV3GQDVaYIEc1Qa-wloidyERutYpXwxLZhbX6vPTo0kjle3-PT8joKbLQWqdBCuzdt35kxVT1ziEOapnElosyFG2PhkG-SDGsD0ScTquJ4jB6bdL8tTkFN-09s85Vd/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/#.WBpc7ODhA2w

[28] Condiciones Actuales del Tiempo Cartago (s. f.). Recuperado el 02 de Noviembre del 2016, de <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionITCR.html>

Apéndices

A.1 Selección de hardware

Para la implementación del sistema será necesario contar con los siguientes componentes electrónicos.

- Placa de desarrollo
- Sensor de temperatura
- Sensor de humedad
- Sensor de dióxido de carbono
- Sensor de luminosidad
- Medio de almacenamiento microSD
- Lámpara
- Reloj en tiempo real (RTC)
- Pantalla
- Ventilador
- Conexión a internet

➤ Placa de desarrollo

La unidad de procesamiento deberá de ser capaz de concentrar toda la información proveniente de todos los sensores y a su vez enviar por medio de una conexión a internet toda la información obtenida, también almacenarla en la memoria micro SD. Esta unidad tiene como función controlar las condiciones físicas que se están desarrollando dentro de la caja.

Características generales que se deberán contemplar:

- Bajo costo y disponibilidad en el mercado
- Dimensiones pequeñas
- Facilidad de usar librerías y repositorios, open source
- Accesibilidad a un compilador adecuado y gratuito

- Disponibilidad de pines de entrada y salida (Digitales y analógicos)
- Bajo consumo de potencia

Tabla A.1.1 Especificaciones técnicas de plataformas de desarrollo comerciales.

Marca	Modelo	CPU	Frecuencia	RAM	ADC	Pines	Interfaces	Precio	Potencia
Arduino	Uno	ATmega328	16 MHz	Flash de 32 KB y una SRAM de 2 KB	10 bits con una máxima de 5v.	20	SPI,I2C y UART	\$25,95	40 mA a 5v 40 mA a 3.3v
Arduino	Mega	Atmega2560	16 MHz	Flash de 256 KB y una SRAM de 8 KB	10 bits con una máxima de 5v.	54	SPI,I2C y UART	\$47.95	40 mA a 5v 50 mA a 3.3v
Arduino	Yun	ATmega32u4 / Atheros AR9331	16 MHz	32 KB / 16 MB	12 bits con una máxima de 5v.	20	SPI,I2C y UART	\$93.95	40 mA a 5v 50 mA a 3.3v
Raspberry pi	2	ARM Cortex-A7	900 MHz	1 GB	10 bits con una máxima de 5v.	40	SPI,I2C, UART, HDMI, CSI, DSI	\$55,95	700 mA a 5 v 1000 mA a 5v

Analizando la tabla A.1.1 y utilizando las características generales que deben cumplir como referencia, se hace elección de un Arduino Mega ADK 2560, el motivo de esto es por su bajo consumo energético comparado con la Raspberry Pi 2. Ahora si lo comparamos con el Arduino uno la diferencia está en la capacidad de la RAM y la cantidad de pines digitales y analógicos

disponibles de una placa a la otra, esto se toma en cuenta, por que la idea es ampliar la cantidad de ambientes controlados por una sola placa de desarrollo lo que el Arduino Mega por su configuración cumpliría. Y por último la comparación con el Arduino YUN es la unión de las dos anteriores, la memoria RAM es bastante pequeña, tomando en cuenta que posee dos procesadores y la cantidad de pines analógicos/digitales es igual a la del Arduino Uno.

➤ Sensores

El módulo de sensores deberá de contar al menos con los siguientes dispositivos electrónicos.

- Sensor de temperatura
- Sensor de humedad
- Sensor de luz
- Sensor de dióxido de carbono

En la tabla A.1.2 se muestran los diferentes tipos de sensores que se encuentran en el mercado para realizar la medición de la temperatura y humedad.

Tabla A.1.2 Especificaciones técnicas de diferentes sensores de temperatura y humedad.

Modelo	Precisión Temperatura	Exactitud	Precisión Humedad	Exactitud	Precio
DHT11	0 a 50 °C	± 2 °C	20 a 80 %	5 %	\$5
DHT22	-40 a 80 °C	± 0.5 °C	0 a 100 %	2 a 5 %	\$9.95
AM2302	-40 a 80 °C	± 0.5 °C	0 a 100 %	2 a 5 %	\$15
HTU21D-F	-30 a 90 °C	± 1 °C	5 a 95 %	± 2%	\$14.95

Todos los sensores mostrados en la tabla A.1.2 cumplen con las características necesarias para satisfacer el proyecto, pero también hay que tomar en cuenta el costo del dispositivo por lo que el DHT22 es el que cumple con todas las necesidades establecidas.

Ahora se hará la comparación para el sensor de luz, por lo que en la tabla A.1.3 se muestran los diferentes tipos que existen en el mercado comercial.

Tabla A.1.3 Especificaciones técnicas de diferentes sensores de luz.

Modelo	Rango de Lux	Interface	Precio
TSL2561	0.1 a 40 000	I2C	\$5.95
TSL2591	188 a 88 000	I2C	\$6.95
BH1750	1 a 65535	I2C	\$5.99

Teniendo en cuenta que para todos los sensores se debe tomar en cuenta el costo del dispositivo, para el sensor de luz no debe ser la excepción, de esta forma el TSL2561 cumple con las características necesarias para la implementación que se desea realizar.

Seguidamente se hará la comparación de dos diferentes tipos de sensores de dióxido de carbono, al ser un sensor no tan utilizado en el mercado, es difícil encontrar gran variedad de modelos, en la tabla A.1.4 se especifican los dos encontrados,

Tabla A.1.4 Especificaciones técnicas de diferentes sensores de dióxido de carbono.

Modelo	Rango (ppm)	Interface	Precio
MG811	350 a 10000	UART	\$46.19
MH-Z19	0 a 5000	UART, PWM	\$200

Como lo especifica la tabla anterior, estos sensores poseen un costo muy elevado, el más accesible es el modelo MG811. De esta forma se escoge la utilización de este sensor para el proyecto.

➤ Medio de almacenamiento microSD

En esta sección debemos de tomar en cuenta varios aspectos bastante relevantes a la hora de guardar la información, tener claro la cantidad de datos que se desean almacenar, la frecuencia con la que se guardan, poseer buena precisión, que el medio de almacenamiento en este caso la SD tenga una capacidad de memoria que responda a la cantidad de datos que se quieren almacenar y por último el formato en el cual se guardan los datos, tenga compatibilidad con diferentes programas de análisis que posee la computadora.

De esta forma, el formato que se propone para el almacenamiento de los datos es el de TXT o "textfile" (archivo de texto), este tipo de archivo cuenta con una estructura de unas series de

líneas de texto. Sirven como almacenes de información, a la vez que evitan las complicaciones propias de otros formatos de archivo, las especificaciones de los dos diferentes modelos se presentan en la tabla A.1.5.

Tabla A.1.5 Especificaciones técnicas de diferentes módulos de almacenamiento de información.

Modelo	Interfaz	Precio
Data Logger Module Logging Shield	SPI	\$7.32
SD Card Breakout Module	SPI	\$5.95

Para estos módulos se necesita una tarjeta micro SD, la cual dependiendo de su capacidad así será su costo, una tarjeta de 8 GB tiene un valor de \$ 8.95 y una de 16 GB tiene un valor de \$ 15.50. Para este caso se adquirió una de 8 GB y el modulo que se adquirió fue el Data Logger que tiene un costo de \$7.32, este módulo cuenta con una gran ventaja y es que, él tiene incorporado un reloj en tiempo real (RTC).

➤ Lámpara

Para la iluminación se necesita una cierta longitud de onda, por lo que se buscan las posibles fuentes de luz que ofrece el mercado, a continuación en la tabla A.1.6 donde se detallan las características principales.

Tabla A.1.6 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de luz.

Modelo	Color	Cantidad de Leds	Potencia real	Precio
270 W Apolo 6 led	Rojo (630nm)/Azul(460nm)	90	160 W~180 W	\$275
Erligpowht LED Red Bue	Rojo(650nm) /Azul(465nm)	225	1125 W	\$27.99
Luz Led 300 W	Rojo(630)/Azul(460nm)	60	300 W	\$25
Adafruit Neopixel	Rojo (630nm)/Azul(475nm)	60	18 W	\$24.95

Al ser led, todas tienen las mismas longitudes de onda que se requieren, los precios varían por la estructura en la que vienen de fábrica, de esta forma se elige la Adafruit Neopixel por el costo que tiene, aparte por la diversa funcionalidad que el fabricante brinda, ya que por medio del arduino se puede controlar el color de luz que se está emitiendo.

➤ Reloj en tiempo real (RTC)

Anteriormente se mencionó que el Shield para la SD trae con él un RTC, pero ante la necesidad en optar por una unidad completamente autónoma en la asignación de la base temporal, se decide a adquirir uno. En la tabla A.1.7 se muestran los distintos modelos que se encuentran en el mercado.

Tabla A.1.7 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de relojes en tiempo real.

Modelo	Formato de hora	Formato de fecha	Interfaz	Precio
DS3231	segundos/minutos/horas	día/mes/año	I2C	\$14,95
Real Time Clock Module	horas/minutos/segundos	mes/fecha/año	I2C	\$15.95
DS3234	segundos/minutos /horas	día/mes/año	I2C	\$19.95
DS1307	hora/minutos/segundos	día/mes/año	I2C	\$9.95

Por disponibilidad del mercado se utilizó el DS3231, aunque existe uno más accesible, se decide por este por el motivo de que había en la tienda por lo que tenía disponibilidad inmediata.

➤ Pantalla

Lo que ofrece el mercado para realizar la visualización de los datos en tiempo real, se presentan en la tabla A.1.8

Tabla A.1.8 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de pantallas táctiles.

Modelo	Resolución	Interface	Precio
Nextion 2.4	320 x 240	UART	\$16.95
Nextion 4.3	480 x 272	UART	\$54.95
Nextion 7.0	800 x 480	UART	\$79.95

La disponibilidad en el mercado es bastante amplia, dependiendo de su tamaño así es el costo, para una mejor visualización del entorno se elige la Nextion 4.3 la cual cuenta con un tamaño aceptable y el costo no es tan elevado para el dispositivo que es.

➤ Ventilador

Para la ventilación del sistema se utiliza un ventilador de computadora los cuales cumplen con la función que se requiere, el costo de cada ventilador se detalla en la tabla A.1.9.

Tabla A.1.9 Especificaciones técnicas de diferentes tipos de ventiladores.

Modelo	Tamaño	Tensión	Precio
12-300 Ludger	8 cm x 8 cm	12 v	\$ 4
FA-Miyakousa	10 cm x 10 cm	12 v	\$6

Hay de muchos tamaños según las necesidades, claro está que el tamaño es directamente proporcional a la cantidad de viento que introduzca a la caja, por lo que según el tamaño de la misma así será el tamaño del ventilador. Al tener un costo tan accesible se utilizó el Miyakousa que tiene un tamaño aceptable para la caja del prototipo.

➤ **Conexión a internet**

Existen varios dispositivos con los cuales se puede realizar la conexión del arduino con internet, el mercado ofrece la conexión vía WiFi o Ethernet dependiendo de la necesidad de las personas, en la tabla A.1.10 se muestra algunos modelos que ofrece el mercado.

Tabla A.1.10 Especificaciones técnicas de diferentes módulos de internet.

Modelo	Protocolos soportados	Protocolo	Interfaz	Precio
SparkFun WiFi Shield	802.11 b/g/n	TCP/IP	UART	\$17.95
Arduino WiFi Shield	802.11 b/g/n	TCP/UDP	SPI	\$99.95
WiFi module ESP8266	802.11 b/g/n	TCP/IP	UART	\$10.60

Se elige el módulo ESP8266, el cual ofrece una solución completa y muy económica para conexión de sistemas a redes WiFi. Este módulo es capaz de funcionar como adaptador de red en sistemas basados en microcontroladores que se comunican con él a través de una interfaz UART.

➤ **Diseño de la caja 3D**

Al ser un prototipo se pensó en diseñar una caja en la cual se pudiera recrear el ambiente controlado, se realizaron dos diseños de los cuales se escogió uno creado por una persona del grupo de trabajo de Indigo, el primer diseño lo realizó mi persona, el cual es el siguiente. Las dimensiones de la caja son, 50 cm de alto por 50 cm de ancho y con un largo de 70 cm.



Figura A.1 Resultado de la caja en la cual se implementó el prototipo.

A.2 Diagramas de interconexión del sistema de ambiente controlado

El sensor de temperatura y humedad DHT22 posee las siguientes características

Tabla A.2.10 Características del sensor DHT22

Rango de tensión	$3.3\text{ Vdc} \leq V_{cc} \leq 6\text{Vdc}$
Rango de medición de temperatura	-40°C a 80°C
Precisión de medición de temperatura	$\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Resolución Temperatura	0.1°C
Rango de medición de humedad	De 0 a 100% RH
Precisión de medición de humedad	2% RH
Resolución Humedad	0.1% RH
Tiempo de censado	2s

El diagrama de conexión con el arduino se presenta en la siguiente figura, el Vcc se conecta a los 5 voltios del arduino directamente, la tierra (GND) del sensor con la del arduino y el pin de datos del sensor al pin digital número 2 del arduino.

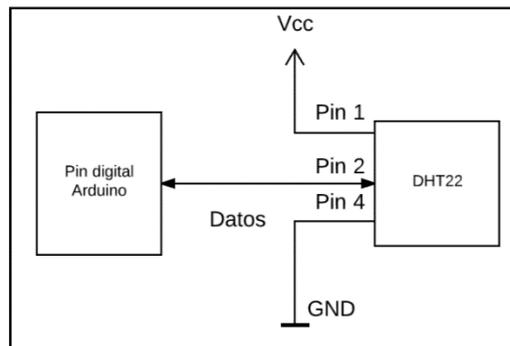


Figura A.2.1 Diagrama modular de la conexión del sensor de temperatura y humedad DHT22 con el arduino.

El sensor de luz TSL2561 posee las siguientes características

Tabla A.2.11 Características del sensor TSL2561

Rango de temperatura	-30 a 80°C
Rango dinámico (Lux)	0.1 a 40 000 Lux
Rango de tensión	2.7 a 3.6 Vdc
Interfaz	I2C

En la figura A.2.2 se muestra como es la conexión de dicho sensor, un dato que hay que tomar muy en cuenta es que su alimentación es de 3.3 voltios por lo que si le conecta una tensión mayor a esa podría quemar el dispositivo. Este sensor trabaja bajo el protocolo I2C el cual se explica detalladamente en el marco teórico (ver sección 2.5).

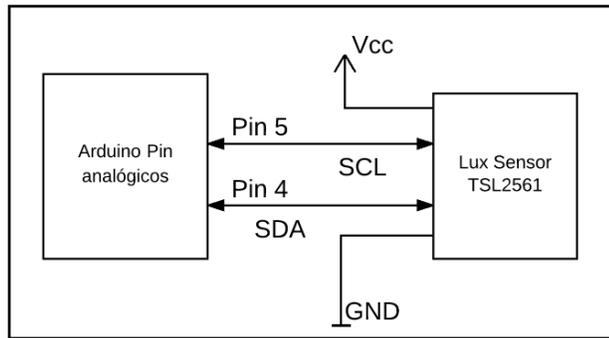


Figura A.2.2 Diagrama modular de la conexión del sensor TSL2561 con el arduino.

El sensor de dióxido de carbono MG811 posee las siguientes características

Tabla A.2.12 Características del sensor de dióxido de carbono MG811.

Rango de tensión	6 Vdc
Temperatura de operación	-20 a +50 °C
Salida	30 a 50 mV

Este sensor trabaja con una tensión de 6 Vdc, el pin analógico del sensor se conecta con el pin analógico número 0 del arduino.

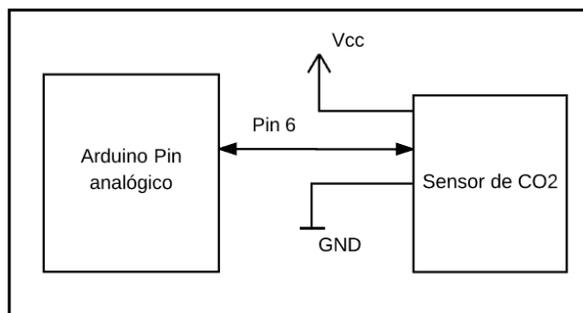


Figura A.2.3 Diagrama modular de la conexión del sensor de dióxido de carbono con el arduino.

El dispositivo que proporciona la conexión WIFI es el ESP8266, el cual posee las siguientes características

Tabla A.13 Características del módulo WIFI ESP8266.

Tensión	3.3 Vdc
ADC	10 bits de precisión
WIFI	2.4 GHz
Soporta	WPA/WPA2
CPU (puede funcionar como procesador)	32 bits
Frecuencia de operación	80 MHz
Alcance	30 metros
GPIO (Entrada/Salida de propósito general)	2 pines

La distribución de pines del módulo es la siguiente,

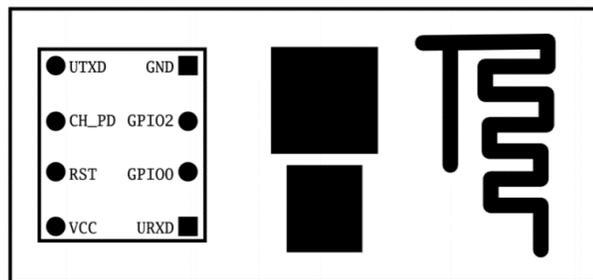


Figura A.2.4 Diagrama de la distribución de pines del módulo ESP8266, tomado de [24].

En el figura A.2.5 se presenta la conexión con el arduino, este dispositivo al igual que el sensor de luz trabaja con una tensión de 3,3 voltios, la fuente interna del arduino da un máximo de 50 mA, cuando el consumo del módulo suele ser en el arranque bastante superior a esto, lo que le llevara a unos arranques poco fiables, y aunque se acaba consiguiendo, deben repetirse una y otra vez. Por lo que para un mejor funcionamiento se requiere de una fuente externa de alimentación de 3.3 v.

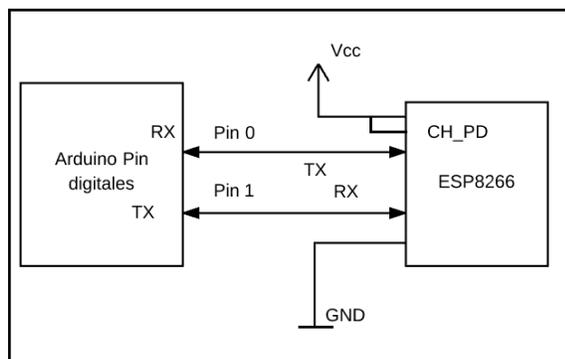


Figura A.2.5 Diagrama modular de la conexión del módulo WIFI ESP8266 con el arduino.

Las luces del prototipo poseen las siguientes características,

Tabla A.2.14 Características de las luces led Neopixel.

Tensión	5 Vdc
Un metro	60 Leds
Control de la iluminación	Por segmentos, o controlado individualmente
Longitudes de onda de los Leds	630nm/530nm/475nm
Corriente	60 mA

La conexión de las luces con el arduino se demuestra en la figura A.2.6, donde el pin 6 digital es el envío constante de datos para determinar cuál es la iluminación que uno requiere, la frecuencia de transmisión es de 800 Kbps, según el fabricante.

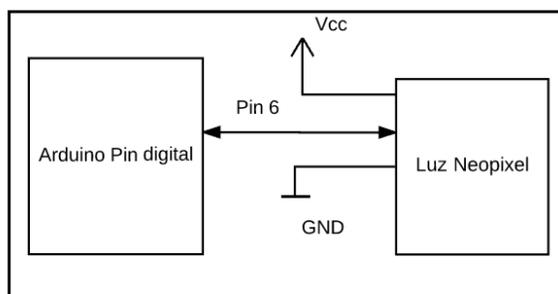


Figura A.2.6 Diagrama modular de la conexión de la luz Neopixel con el arduino.

La línea de 1 metro que conforma la luz esta entre lazada con 60 leds los cuales se conectan entre sí como lo podemos ver en la siguiente figura,

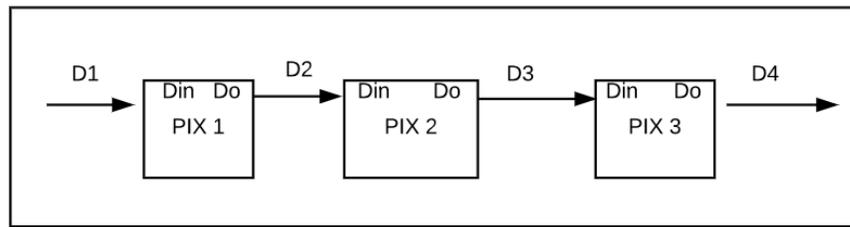


Figura A.2.7 Diagrama modular de la conexión de la luz Neopixel Led por Led, tomado de [22].

Cada PIX 1 es un led el cual tiene su entrada de datos Din y su salida hacia el próximo led llamada Do, de esta forma es la configuración de todo el metro.

Para la conexión del ventilador que nos permite mantener la temperatura ideal para el crecimiento de las plantas, se creó un diagrama el cual explica cómo es su conexión con un relé y el arduino respectivamente. El ventilador requiere de una tensión de 12 v por lo cual se utilizó una fuente externa para ello. En el caso de el relay se conecta a los 5 v del arduino, al igual que la tierra (GND) y al pin 23 el cual es el que envía la señal de encendido o apagado en los momentos que se requiera.

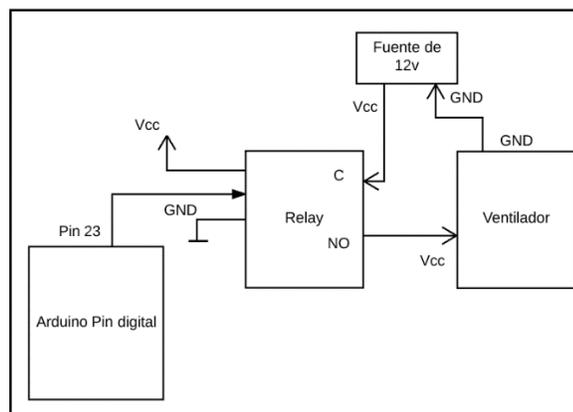


Figura A.2.8 Diagrama modular de la conexión del ventilador con el arduino.

En la figura A.2.9 se muestra como es la forma de conectar el shield de la SD con el arduino, al ser una placa especialmente diseñada para estas tarjetas de desarrollo su montaje es realmente fácil. En este caso como se está conectado a un arduino mega, el pin de chipSelect (CS) del shield

se debe conectar al pin número 53 del arduino, esto porque la configuración interna de la tarjeta es distinto al del arduino uno por ejemplo.



Figura A.2.9 Diagrama de la conexión del shield data logger con el arduino, tomado de [25]

Sistema de riego

Para la conexión de este sistema se adquirió una manguera, una bomba de pecera sumergible y dos micros aspersores. Al ser una caja se requiere menores cantidades de agua, esto también dependiendo de la etapa en la que se encuentran, ya que en la etapa de germinación la cantidad de agua que necesitan es realmente poca (ver figura 2.1). A continuación se muestran en la siguiente imagen los componentes de este sistema.

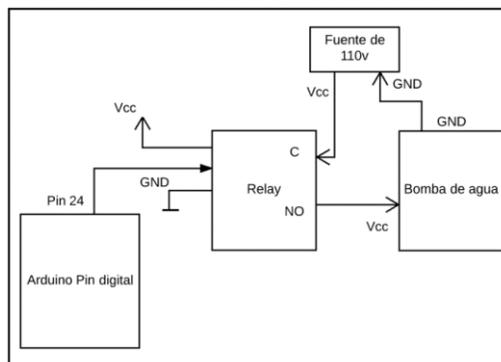


Figura A.2.10 Diagrama de la conexión de la bomba de agua.

A.3 Fórmulas utilizadas en el informe

Fórmula del porcentaje de error.

$$\frac{|Valor\ referencia-Valor\ promedio|}{Valor\ referencia} \times 100 = \% Error \quad [1]$$

Fórmula del promedio.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1+a_2+a_3+\dots+a_n}{n} \quad [2]$$