

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Diseño e Implementación de un control predictivo para un sistema de distribución de iluminación artificial utilizado en cultivos cerrados de Orquídeas.”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

**MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL
INDUSTRIAL**

NOMBRES COMPLETOS

Ing. Juan Diego Quishpe

Ing. Christian David López Cárdenas

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2021

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme el don de la vida. A mis padres que confiaron en mí a pesar de todas las adversidades y por cada uno de sus consejos que estarán presentes en mi mente. A mis hermanos que me brindaron su apoyo y ayuda incondicional.

Juan Diego

Queremos agradecer primero a Dios, por permitirnos llegar hasta este momento tan importante en nuestra formación profesional, aún más durante esta pandemia.

A mis padres, amigos, compañeros de profesión, que de una u otra manera, nos ayudaron y motivaron a lo largo de toda la maestría.

A nuestro tutor de tesis y la Escuela Superior Politécnica del Litoral por brindarnos sus conocimientos y oportunidades.

Christian López

DEDICATORIA

Dedicado a mi Hija Isabella y a mi madre Beatriz que han estado a mi lado durante todo este proceso de formación.

A la Escuela Superior Politécnica en cuyas aulas logre mi formación Profesional y a su personal docente por su calidad educativa y profesional que guiaron mi aprendizaje.

Juan Diego

El presente trabajo está dedicado a nuestras familias que han sido nuestro apoyo a lo largo de toda la maestría. En especial a mi esposa e hijo por brindarme su apoyo incondicional.

Christian López

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Ph.D. María Álvarez Villanueva

SUBDECANO DE LA FIEC



.....
Ms.C. Richard Sánchez

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALBERTO
SALAZAR LOPEZ**

.....
Ms.C. Carlos Salazar

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



Ing. Juan Diego Quishpe



Ing. Christian López Cárdenas

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Solución Propuesta	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Metodología.....	3
CAPÍTULO 2	5
2. CONTEXTO Y ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Sistemas de Iluminación en cultivos	6
2.2 Sistemas de Control y Automatización de Cultivos	7
2.3 Trabajos relacionados	8
CAPÍTULO 3	10
3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA	10
3.1 Selección de los dispositivos.	10
3.1.1 Sistema Embebido.	10
3.1.2 Sistema de sensado	12
3.1.3 Sistema de Riego	19
3.1.4 Sistema de Ventilación.	19
3.1.5 Sistema de Iluminación.....	20
3.2 Diseño de Circuitos.	23
3.2.1 Circuitos de Potencia.....	23
3.3 Diseño de la Estructura.	26
3.4 Sistema de Control.	27
3.5 Estrategias de Control	28
3.6 Interfaz de usuario.....	33

CAPÍTULO 4	36
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
ANEXOS	
BIBLIOGRAFIA	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Tecnología LED en el cultivo de lechuga	7
Figura 2-2. Tablero de Control en Invernadero	8
Figura 3-1 Arduino Mega 2560 Rev3.....	10
Figura 3-2 IDE Arduino.....	11
Figura 3-3 Sensor OPT101.	12
Figura 3-4 Resistencia relativa	14
Figura 3-5 Sensibilidad de Fotorresistencias	14
Figura 3-6. Divisor de voltaje para Fotorresistencia.....	15
Figura 3-7 Circuito de Fotorresistencia-Sistema Embebido.	15
Figura 3-8 Sensor DHT11	16
Figura 3-9 Sensor de humedad de suelo.....	18
Figura 3-10 Bomba de agua para riego	19
Figura 3-11 Sistema de Ventilación	19
Figura 3-12 Lámpara Led	20
Figura 3-13 Bombilla incandescente	20
Figura 3-14 Espectro para la fotosíntesis de las plantas.....	22
Figura 3-15 Circuito PWM de lámparas LED.	23
Figura 3-16 Esquema de un circuito Puente H	24
Figura 3-17 Módulo Puente H L298N.	24
Figura 3-18 Modulación por ancho de pulso.....	25
Figura 3-19 Módulo Relevador.	25
Figura 3-20 Circuito Potencia Relevador	26
Figura 3-21 Modelo 3D del prototipo	26
Figura 3-22 Espacio de trabajo del prototipo.	27
Figura 3-23 Esquema General	27

Figura 3-24 Diagrama de Bloques.....	28
Figura 3-25 Diagrama general de un sistema de control	29
Figura 3-26. Subsistema con lazo cerrado.	29
Figura 3-27. Subsistema de control de Temperatura	30
Figura 3-28 Resultados experimentales del Sistema de Iluminación	31
Figura 3-29 Identificador del modelo	32
Figura 3-30 Esquema de Interfaz de Usuario	34
Figura 3-31. Interfaz de control.....	35
Figura 4-1. Campana Gaussiana de la distribución de energía.	38
Figura 4-2. Resultado de la Prueba 1 Control Predictivo	39
Figura 4-3. Resultado de la Prueba 2 Control Predictivo.	39
Figura 4-4. Resultado de la Prueba 3 Control Predictivo	39
Figura 4-5. Resultado de la prueba 1 Control PD	40
Figura 4-6. Resultado de la prueba 2 Control P.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Valores de Fotorresistencias.....	13
Tabla 4-1. Temperaturas requeridas para Orquídeas.....	36
Tabla 4-2. Pruebas de PID Predictivo	38
Tabla 4-3 Parámetros de PID	40

CAPÍTULO 1

1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Conforme la sociedad avanza la calidad de los productos agrícolas, así como plantas de horticultura son cada vez más altos provocando que los métodos tradicionales de cultivo como el mulching, el uso de abonos o la rotación de cultivos, no puedan llegar a cumplir con los requisitos que son cada vez mayores.

Los cambios climáticos causan grandes pérdidas económicas en el sistema tradicional de cultivo al aire libre en donde no se controla factores como humedad temperatura o cantidad de luz, lo cual ha generado un creciente uso de sistemas de cultivo protegidos y el desarrollo de nuevas tecnologías como el uso de lámparas LED (Light Emitting Diode) para procesos relacionados a la agricultura [1].

Los sistemas de invernadero presentan la ventaja de permitir controlar el clima interior para optimizar el crecimiento del cultivo protegiéndolos de las inclemencias del tiempo. Sin embargo, el control de estos sistemas es complejo debido fundamentalmente a que son procesos físico-químicos multivariantes [2].

Es bien sabido que el crecimiento de las plantas está estrechamente relacionado con la luz. En un día nublado, dado que la intensidad de la luz y el tiempo de iluminación no son suficientes para el crecimiento de las plantas, la tasa de fotosíntesis cae bruscamente. Resulta en una menor acumulación de masa seca y más susceptible a enfermedades y plagas [3].

La tendencia actual va más allá del sólo hecho de controlar la temperatura y humedad del sistema, sino que, por el contrario, se desea controlar tanto el clima interior como aquellas variables físicas del cultivo, llegando a hacerse un control de crecimiento, plagas, etc.

En [4] se analiza la relación que existe entre la intensidad de luz a la que es expuesta una planta y su capacidad para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. EL autor Ying analiza cuatro especies diferentes (hojas de soya, arroz, maíz y banaba) y debido a que los resultados de crecimiento han sido similares, proponen una única función de crecimiento en función de la intensidad lumínica.

En cuanto a los métodos de control empleados existen diferentes técnicas que van desde simples circuitos de control que conmutan el estado de lámparas en función de las lecturas de los sensores de intensidad lumínica hasta circuitos más complejos

que involucran un algoritmo de control más avanzado como puede ser el control difuso para el control de más de una lámpara [5]

De igual manera se han sumado otros indicadores y variables a controlar a la par con la calidad. Por ejemplo, se requiere la disminución del consumo de materias primas, así como se ha integrado la disminución del consumo de energía estando las mismas en una estrecha relación con la mayoría de los procesos industriales modernos [6].

Estas exigencias a las variables interrelacionadas han hecho que muchas de las técnicas de ajuste PID desarrolladas para los procesos modelados como de simple entrada, simple salida (SISO) sean insuficientes para encarar este tipo de proceso de múltiple entrada, múltiple salida (MIMO) [7].

En los sistemas MIMO con control predictivo el ajuste de parámetros del controlador de un lazo afecta el desempeño de todos los lazos, lo que provoca la aparición de condiciones de inestabilidad en todo el sistema.

Se han realizado grandes esfuerzos por encontrar técnicas de diseño, reglas de sintonía de los parámetros de los controladores para los sistemas MIMO; pero la implementación del sistema de control multivariable sigue siendo un problema difícil para los ingenieros de control debido a la falta de enfoques prácticos [7].

1.2 Solución Propuesta

El sistema de control de iluminación artificial para cultivos cerrados de Orquídeas se encuentra desarrollado bajo una arquitectura del tipo cliente – HMI, la misma que parte desde las recepciones provenientes de los sensores, estas señales son procesadas mediante el uso de un sistema micro procesado; mediante esta información se generará un correcto sistema de control para un sistema de iluminación.

La calidad de la luz bajo condiciones controladas puede modificar el crecimiento y la calidad de muchos cultivos como por ejemplo hortícolas y, por lo tanto, puede afectar considerablemente su valor en el mercado.

La iluminación bien distribuida proporciona un crecimiento para las plantas; esta se compone de tres tipos con diferentes colores, que está de acuerdo con el espectro de absorción de la fotosíntesis. La intensidad de la luz debe ser la adecuada para las necesidades de fotosíntesis de las plantas, y estas características brindan una gran comodidad al personal encargada del cultivo las mismas que necesitan un bajo costo de fabricación, con bajo consumo de energía, alta confiabilidad y larga vida útil, todas

estas características permitirán mejorar crecimiento de la planta mejorando la producción.

Además del control de luz, este tipo de cultivos tienen otras variables como la temperatura y humedad las mismas que se podrán variar mediante la introducción de aire del exterior por un lado y sacar el aire más caliente del interior por otro lado, afectando en mayor medida a la temperatura del interior, también se debe garantizar la humedad del suelo y de las plantas.

El sistema de control predictivo que se plantea en este trabajo de titulación puede estar inmerso en un sistema micro controlado basado en hardware y software libre como lo es Arduino, este tipo de sistemas ha demostrado ser eficientes en el control de procesos físicos-químicos.

1.3 Objetivos

3.5.1 Objetivo General

Diseñar un control predictivo mediante el uso de hardware y software libre para un sistema de iluminación artificial utilizado en cultivos cerrados.

3.5.1 Objetivos Específicos

- a) Determinar el modelo matemático que permita obtener el mejor desempeño en un sistema de control predictivo.
- b) Obtener el modelo matemático del sistema de iluminación y hacer una simulación previa del sistema de control original.
- c) Diseñar el controlador predictivo que permita optimizar el desempeño ante diferentes escenarios mediante un ayudante de diseño.
- d) Crear un prototipo de invernadero inteligente que permita realizar las pruebas respectivas del sistema de control, así como verificar los resultados.
- e) Diseñar y construir los circuitos de potencia necesarios para el sistema de iluminación artificial.
- f) Elaborar una interfaz de usuario que permita la instrumentación virtual que ofrezca la flexibilidad para adaptar el control a diferentes tipos de cultivo.

1.4 Metodología

Las metodologías que se pretenden usar en esta investigación son: descriptiva y la correlacional.

La investigación descriptiva busca especificar las propiedades, las características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis [8].

La investigación correlacional es un tipo de estudio que tiene como propósito evaluar la relación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables (en un contexto en particular). Los estudios cuantitativos correlacionales miden el grado de relación entre esas dos o más variables (cuantifican relaciones). Es decir, miden cada variable presuntamente relacionada y después también miden y analizan la correlación. Tales correlaciones se expresan en hipótesis sometidas a prueba [9].

La investigación que se llevará a cabo es de tipo descriptiva debido a que se analizará los modelos de múltiples entradas como humedad, temperatura, iluminación, perturbaciones como luz o humedad ambiente; y múltiples salidas como ventilación, riego, generación de calor; así como el de diseño de controladores predictivos. A su vez es correlacional ya que se evaluará la relación que existen entre dos o más factores con el fin de conocer el comportamiento de un factor conociendo el de otro.

Se identificará cuales son las características que hacen que un controlador predictivo sea eficiente y cumpla de manera satisfactoria el trabajo. La identificación de las mismas se realizará a través de la recolección y análisis de información de cada una de las variables que afectan el rendimiento del controlador.

CAPÍTULO 2

2. CONTEXTO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se desarrolla una revisión bibliográfica en la cual se explora los trabajos destacados en base al objeto de estudio que para este caso se trata de sistemas de iluminación inteligente para cultivos cerrados.

En la actualidad el curso de recursos energéticos no renovables tiene un incremento que se presenta día tras día, la contaminación del agua, suelo y aire, además de la deforestación cada vez es más evidente así como sus estragos se pueden notar, en vista de lo antes mencionado tomar medidas para un desarrollo económico que sea amigable con el medio ambiente, este tipo de desarrollo se denomina sustentable y es fundamental; el diseño bioclimático de las edificaciones y el uso de herramientas tecnológicas como la domótica permite obtener una aplicación que pueden prevenir aún más daño en el medio ambiente [10].

El concepto de domótica hace referencia al desarrollo de la automatización y control de equipos y sistemas electrónicos [11], se puede aplicar al desarrollo de viviendas inteligentes, lo que permite su gestión sobre seguridad, confort y comunicación.

El uso de nuevas tecnologías que brinden soluciones a temas relacionados con el desarrollo agrícola, ha permitido que el uso de estas herramientas tecnológicas permita planificar y controlar diferentes tipos de cultivos [12], de igual manera el desarrollo de diversos sistemas de control en procesos de producción de alimentos, calidad de tierra y mejoramiento de la salud pública [13], por consiguiente los sistemas de control en cultivos permitirán mejorar la producción de cualquier tipo de planta [12].

Conforme la tecnología en el sector agrícola gana impulso, debe superar desafíos sobre la preocupación por el cuidado del medio ambiente, el consumo eficiente de energía y la salud de los consumidores de alimentos. El uso de sistemas de iluminación artificial se puede considerar un avance tecnológico prometedor para la solución de los problemas presentados anteriormente [14].

La agricultura denominada convencional (métodos ancestrales de cultivo) se enfrenta a una demanda de producción elevada, prácticas de cultivo ecológicas y sostenibles, escasas de agua entre otras; ya que se basa en una metodología dependiente del

suelo [15], además debe superar desafíos como escasez de tierras para cultivos debido al crecimiento de la población, condiciones climáticas anormales [16].

2.1 Sistemas de Iluminación en cultivos

Los avances más importantes en los últimos 50 años en el sector agrícola es la implementación del concepto de fábrica de plantas, las mismas que se pueden construir en cualquier lugar, además su construcción es de manera vertical, esta estructura permite que la producción aumente en comparación con granjas tradicionales. El aumento se debe al uso de iluminación artificial y aire acondicionado, ya que permiten que la producción de cultivos sea durante todo el año, con una dependencia reducida del clima exterior [17].

Con la invención de la tecnología LED en la agricultura la investigación en esta rama se ha impulsado, un ejemplo se presenta en la NASA que ha llevado a cabo una amplia gama de investigaciones relacionadas con métodos nuevos de cultivo, como el hidropónico, investigaciones de comparación entre diferentes espectros de Diodos Emisores de Luz basada en radiación térmica [18], este tipo de investigaciones están enfocadas por ejemplo en el método de cultivo hidropónico para estaciones espaciales lunares [19] y en marte [20].

En [21] se analiza diferentes estudios sobre la incidencia de la luz LED sobre la lechuga en un ambiente controlado tal como se puede observar en la figura 2-1, además indica que no existe suficiente información científica sobre los efectos de la luz LED suplementaria en el crecimiento de la lechuga cultivada en un método hidropónico al aire libre.

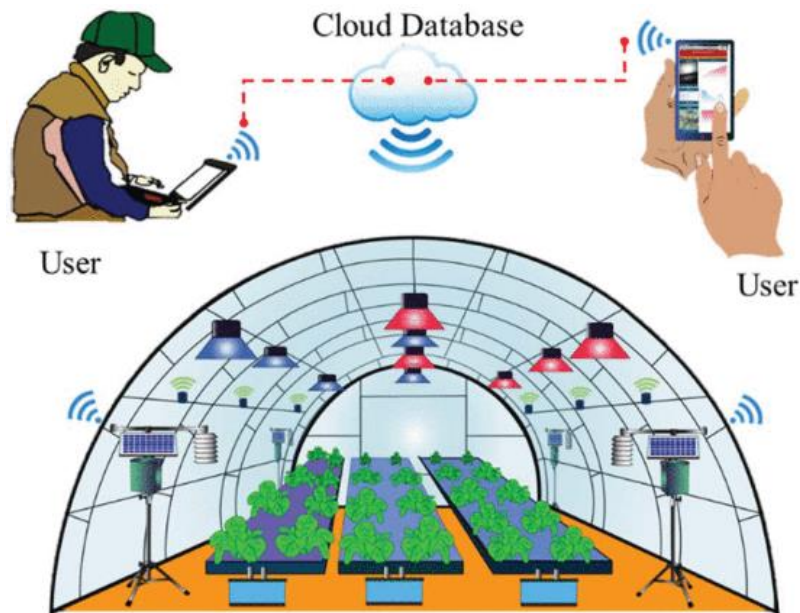


Figura 2-1. Tecnología LED en el cultivo de lechuga [21].

Uno de los principales desafíos que presenta el uso de iluminación artificial en el cultivo de plantas es gestionar la cantidad de energía consumida para obtener un equilibrio en el costo de la electricidad [22].

2.2 Sistemas de Control y Automatización de Cultivos

La automatización de procesos busca la forma de sustituir diferentes tareas o actividades realizadas por personas, con el uso de dispositivos mecánicos, eléctricos, electrónicos y de control [23].

El avance tecnológico conforme pasó el tiempo permitió optimizar el funcionamiento de lugares de cultivos de plantas llamado invernadero, la optimización se logró mediante la automatización de: distribución de agua de riego, temperatura, ventilación y distribución de químicos para fumigar los cultivos [24].

La mayoría de los horticultores poseen en sus invernaderos, computadoras o microcontroladores para el control de acciones como: riego, control de pH, drenaje, etc. La mayoría de estos sistemas poseen compatibilidad con una amplia gama de algoritmos de control, así como entornos de programación. Un ejemplo de esto lo podemos observar en la figura 2-2, además mediante estos sistemas de control se puede manipular: accionamientos para la apertura de ventanas para ventilación y riego, además permite el monitoreo de variables que se van a modificar [25].



Figura 2-2. Tablero de Control en Invernadero [25].

Los sistemas de control enfocados en la iluminación son extensamente usados en sistemas domóticos, la iluminación, según estimaciones de la International Energy Agency (IEA), representa el 20% del consumo mundial de energía eléctrica [26]. En diferentes estudios realizados se ha concluido que mediante un sistema de control adecuado se puede optimizar el ahorro consumo energético.

2.3 Trabajos relacionados

En la bibliografía relacionada al tema de esta investigación se puede encontrar diversas soluciones a sistemas de control para iluminación artificial en cultivos, las mismas que se detallan a continuación.

En [27] se realiza un sistema de control para cultivos protegidos, el cual permite controlar la energía que se consume durante todo el proceso de cultivo. Todo este proceso de control se realiza desde una interfaz en una computadora y una tarjeta de adquisición de datos.

En la investigación [28], se detalla un diseño para el control de iluminación, temperatura y humedad para una vivienda de personas con lesiones medulares, este sistema automatizado fue elaborado con software libre, específicamente hablando con una placa de desarrollo Arduino.

Mediante el proyecto [29] se desarrolló un dispositivo domótico para el control de iluminación de forma remota mediante el uso de dispositivos con acceso a red, con protocolos ZigBee, en esta investigación se recopiló toda la información posible para luego transmitirla de forma inalámbrica hacia una institución o un lugar a un bajo costo.

En el trabajo de investigación [30] se detalla la elaboración de un sistema de iluminación artificial para el cultivo y preservación en una fábrica de plantas medicinales, este sistema trata una línea de producción de plantas en múltiples ejes verticales, las que requieren de un área de cultivo aislada del medio externo, en donde se monitorea variables como temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono, e iluminación con el objetivo de mejorar el rendimiento de producción.

Además de los trabajos anteriormente presentados, cabe mencionar que la tecnología relacionada a la agricultura en un ambiente controlado ha sufrido un desarrollo mundial de manera exponencial [31], por ejemplo países como Japón, Corea, Taiwán, China, Estados Unidos, Holanda, entre otros, han invertido en investigación y desarrollo que permita establecer plataformas de cultivo para la producción de plantas que funcionen como alternativas de negocio, para lograr este objetivo se han establecido actividades gubernamentales e incluso empresas privadas que trabajan en conjunto con institutos de investigación y universidades.

a) Japón.

En este país un número cercano a 200 fábricas de plantas con luz artificial con fines comerciales con un valor cercano a los 100 millones de dólares, la mayoría de estas empresas son de carácter privado, empresas como Spread Co. Ltd. Y Mirai Co. Ltd. Encabezan el mercado con sus infraestructuras que producen cerca de 23000 y 10000 lechugas por día respectivamente [31].

b) Corea.

En este país se estima que en 5 años el mercado para este tipo de fábricas (PFAL) abarca un valor de 577 millones de dólares por año, gracias a iniciativas gubernamentales que han promovido el desarrollo de este tipo de tecnologías mediante interfaces automatizadas de tecnologías de la información; además, este país promueve el “Plan de promoción para la convergencia de la industria agroalimentaria y las tecnologías de la información y la comunicación”, iniciativa que ha permitido la creación de granjas inteligentes las cuales han mejorado los procesos de producción y cultivos en ambientes controlados [31].

CAPÍTULO 3

3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En esta sección se detalla de manera detallada la elaboración del sistema planteado, desde los conceptos teóricos hasta la implementación práctica mediante el desarrollo del prototipo de invernadero.

3.1 Selección de los dispositivos.

Para determinar los dispositivos a ser usados en esta investigación se realizó un estudio de forma detallada sobre temas relacionados a las aplicaciones de la investigación, permitiendo obtener el sistema embebido, dispositivos para el control, dispositivos para el ingreso de datos, elementos de la etapa de potencia y los actuadores.

Todos los elementos seleccionados para el desarrollo de esta investigación cumplen con características que satisfacen el funcionamiento y que además permiten la resolución del problema presentado, a continuación, se detallan los elementos seleccionados:

3.1.1 Sistema Embebido.

Mediante el análisis de diferentes Sistemas Embebidos, el dispositivo seleccionado es el Arduino Mega 2560 Rev3 el cual se presenta en la figura 3-1.



Figura 3-1 Arduino Mega 2560 Rev3 [32].

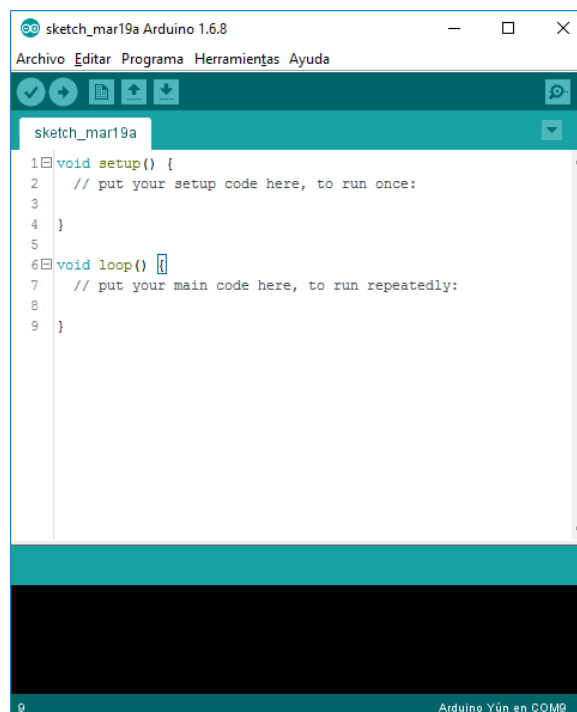
El Arduino Mega 2560 es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada / salida digital (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio.

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en código abierto, lo que quiere decir que su hardware y software se pueden modificar, lo que ha llevado a que esta plataforma sea versátil y con funcionamiento sumamente sencillo, permitiendo resolver problemas específicos [33].

Para la programación de este tipo de plataforma se utilizó el software Arduino Programming Language que está basado en wiring, de igual manera se puede utilizar el Arduino Development Environment que está basado en processing [34].

Durante el desarrollo de esta investigación se utilizó el Arduino Development Environment mejor conocido como IDE, el cual se puede descargar de forma gratuita desde la página oficial de Arduino (<https://www.arduino.cc/en/software>), este software se puede instalar en Windows, Mac y Linux [35].

Un programa básico de Arduino posee una estructura definida por el software IDE, el cual divide al programa en forma general en dos partes mediante el uso de funciones, Setup y Loop. La primera constituye la configuración o preparación del programa, en esta sección se declaran variables, se inicializan librerías o comunicaciones, esta función solo se ejecuta una vez al momento de encender el Sistema Embebido; la función Loop () es una función que se ejecutará de manera infinita al encender el Arduino, y se ejecutará después de la función Setup (), en la figura 3-2.



```
sketch_mar19a Arduino 1.6.8
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_mar19a
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }
```

9 Arduino Yún en COM9

Figura 3-2 IDE Arduino [35].

3.1.2 Sistema de sensado

Los sensores se pueden considerar dispositivos electrónicos que permiten interactuar con el entorno, además, proporcionan información de variables que se desea monitorear, esta información será procesada para así poder generar acciones en un proceso, mediante un sistema de control.

Para el desarrollo de esta investigación las variables a monitorear son: humedad, temperatura, intensidad lumínica, para estas variables existen diferentes sensores que pueden cumplir este objetivo, a continuación, se detallan los sensores usados, así como una descripción de cada uno de ellos.

- **Sensor OPT101**

Es un sensor de transimpedancia basado en un fotodiodo monolítico con amplificador, esta combinación está encapsulada en un chip que permite eliminar problemas en aplicaciones discretas, con errores de fuga de iluminación, ruido electrónico [36].

Este sensor permite obtener como salida un aumento de voltaje lineal conforme la intensidad de luz cambia, además este sensor está diseñado para la conexión de una fuente de voltaje simple o doble, en la figura 3-3 se puede observar el tamaño reducido del sensor y su componente principal.



Figura 3-3 Sensor OPT101 [36].

- **Fotorresistencia.**

Las fotorresistencias o LDR (Light Dependent Resistor) son como su nombre indica resistencias cuyo valor varía en función de la cantidad de luz que incide sobre su superficie. El valor de su resistencia disminuye cuando la incidencia de luz aumenta, en la tabla 3-1 se puede apreciar el modelo comercial de la fotorresistencia, así como valores de resistencia en base a la luminosidad.

fotorresistencia	resistencia mínima con luz	resistencia máxima con luz	resistencia sin luz
GL5516	5 K Ω	10 K Ω	500 K Ω
GL5528	10 K Ω	20 K Ω	1 M Ω
GL5537-1	20 K Ω	30 K Ω	2 M Ω
GL5537-2	30 K Ω	50 K Ω	3 M Ω
GL5539	50 K Ω	100 K Ω	5 M Ω
GL5549	100 K Ω	200 K Ω	10 M Ω

Tabla 3-1 Valores de Fotorresistencias [37].

Este tipo de sensores posee un valor máximo de alimentación de 150V y su tiempo de respuesta es de aproximadamente 30ms, algunos modelos abarcan la mayoría de espectro visible, sin embargo, existen modelos específicos para luz verde, infrarroja; la temperatura es capaz de modificar su sensibilidad es decir si la temperatura aumenta su resistencia también cambia tal como se puede observar en la figura 3-4 que describe la curva característica del comportamiento de la fotorresistencia en función de la temperatura.

resistencia relativa a la temperatura

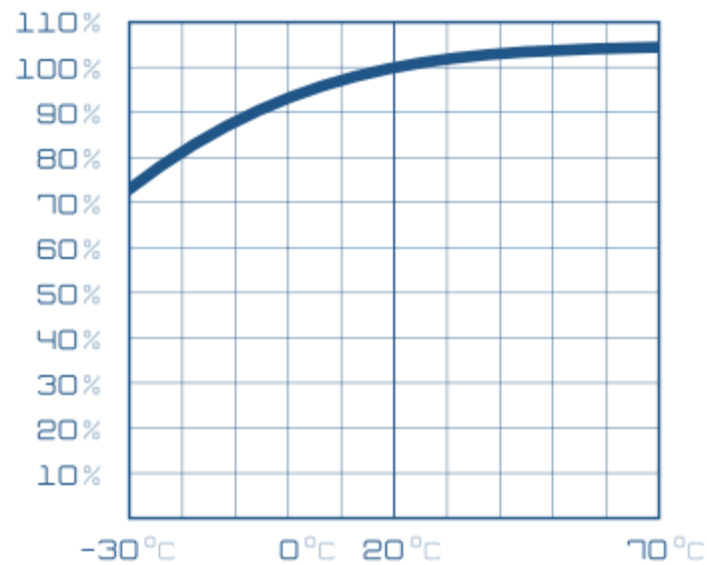


Figura 3-4 Resistencia relativa [37].

Este tipo de sensores son económicos sin embargo no son muy precisas, además su sensibilidad tal como se puede observar en la figura 3-5, por lo que se puede considerar a las fotorresistencias como sensores para detectar la presencia de luz más que para medir su intensidad [37].

máxima sensibilidad (10 lux) 540 nm

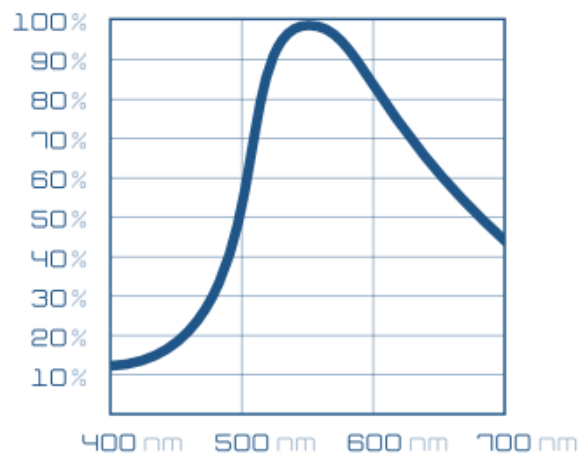


Figura 3-5 Sensibilidad de Fotorresistencias [37].

La conexión que se realiza para utilizar este tipo de sensores con Sistemas Embebidos es mediante el uso de un divisor de voltaje, tal como se puede observar en la figura 3-6.

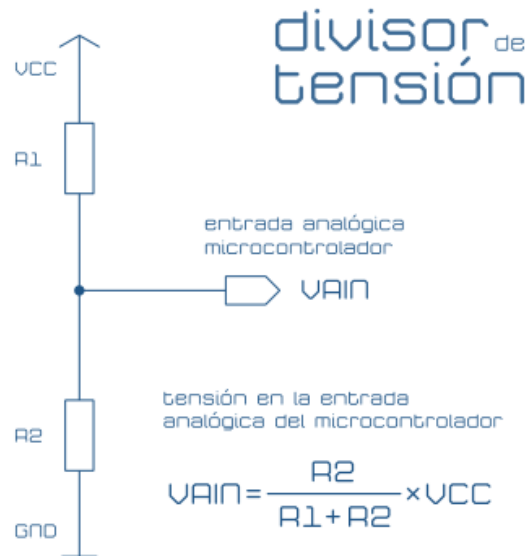


Figura 3-6. Divisor de voltaje para Fotorresistencia [37]

El voltaje que ingresará al Arduino Mega es del tipo analógico y el valor máximo admitido es el detallado en el datasheet del Sistema Embebido. El circuito implementado en esta investigación para mejorar la sensibilidad se detalla en la figura 3-7, en donde se utilizó el pin AREF mediante el uso de un divisor de voltaje.

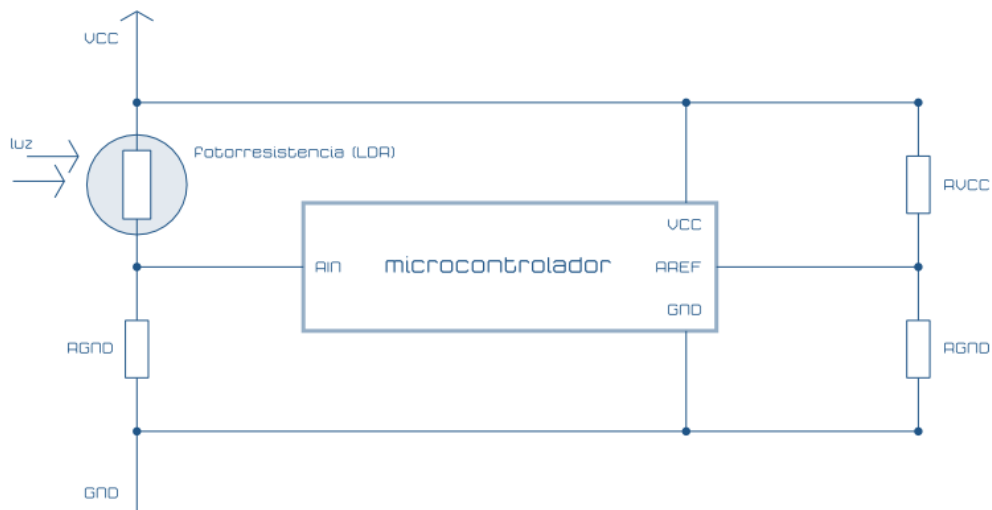


Figura 3-7 Circuito de Fotorresistencia-Sistema Embebido [37].

El valor de la resistencia R_{VCC} del circuito anterior debe ser igual al menor de la fotorresistencia y el de la resistencia R_{GND} debe ser igual al de la resistencia que conecta a masa la entrada analógica del microcontrolador y la LDR. Para la resistencia R_{GND} se suele usar un valor 10 K Ω .

Sería raro que mereciera la pena para el caso de usar Fotorresistencias, pero con carácter general para medidas analógicas, para conseguir la precisión que se pierde por la tolerancia de las resistencias y para poder realizar ajustes, es posible utilizar una resistencia variable con la que afinar el valor de la tensión de referencia [37].

El correspondiente programa para medir la luz con Arduino y una LDR es muy sencillo, se trata solamente de medir de forma analógica la tensión; la luminosidad será mayor cuanto mayor sea la tensión ya que a más luz menos resistencia y por tanto más tensión. Para trabajar con la referencia que aporta el divisor de tensión, si se usa, se inicia a Arduino con `analogReference (EXTERNAL)`; que significa que el mayor valor de tensión medida (de forma analógica) será el aplicado al pin AREF [37] [38].

- **Sensor DHT11.**

Es un sensor digital que permite medir la temperatura y humedad relativa, es de bajo costo, integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circulante, la señal de salida se obtiene mediante un pin de datos ya que no posee un pin analógico tal como se puede observar en la figura 3-8.

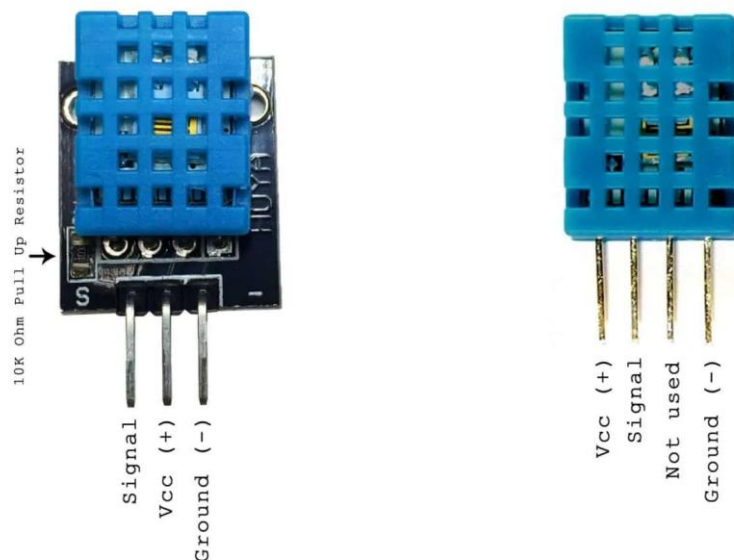


Figura 3-8 Sensor DHT11 [39]

Este tipo de sensor es ampliamente usado para aplicaciones relacionadas con control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura, entre otras [40].

Una de las mayores desventajas de este sensor es el tiempo de respuesta (2 segundos), el protocolo de comunicación entre el sensor y el microcontrolador emplea un único hilo o cable, la distancia máxima recomendable de longitud de cable es de 20m., de preferencia utilizar cable apantallado. Proteger el sensor de la luz directa del sol (radiación UV). En comparación con el DHT22 y DHT21, este sensor es menos preciso, menos exacto y funciona en un rango más pequeño de temperatura / humedad, pero su empaque es más pequeño y de menor costo [40].

A continuación, se detallan las especificaciones técnicas de este sensor.

- Voltaje de Operación: 3V - 5V DC
- Rango de medición de temperatura: 0 a 50 °C
- Precisión de medición de temperatura: ± 2.0 °C
- Resolución Temperatura: 0.1°C
- Rango de medición de humedad: 20% a 90% RH.
- Precisión de medición de humedad: 5% RH.
- Resolución Humedad: 1% RH
- Tiempo de sensado: 1 seg.
- Interface digital: Single-bus (bidireccional)
- Modelo: DHT11
- Dimensiones: 16*12*5 mm

Los parámetros del sensor son:

- Humedad relativa:
 - Resolución: 16 bits
 - Repetibilidad: $\pm 1\%$ H.R.
 - Precisión: 25 ° C $\pm 5\%$ hr
 - Histéresis: $< \pm 0.3\%$ RH
 - Estabilidad a largo plazo: $< \pm 0.5\%$ hr / año
- Temperatura:
 - Resolución: 16 bits
 - Repetibilidad: ± 0.2 ° C
 - Precisión: 25 ° C $\pm 2^\circ$ c
- Características eléctricas
 - Fuente de alimentación: DC 3.5 ~5.5V
 - Corriente: medición 0.3mA

- Espera 60μA
- Periodo de muestreo: más de 2 segundos
- Descripción pines:
 - VDD alimentación 3,5~5.5V DC
 - serie de datos, un solo bus
 - NC, pin vacío
 - GND tierra, la energía negativa
- **Sensor Humedad FC-28.**

Es un sensor que permite medir la humedad que existe en el suelo, este tipo de sensores son ampliamente usados para aplicaciones como: sistemas de riego automáticos, control de humedad en el suelo, etc.

Es un sensor sencillo que mide la humedad del suelo por la variación de su conductividad. No tiene la precisión suficiente para realizar una medición absoluta de la humedad del suelo, se distribuye con una placa de medición estándar que permite obtener la medición como valor analógico como se puede apreciar en la figura 3-9, activada cuando la humedad supera un cierto umbral.

Los valores obtenidos van desde 0 sumergido en agua, a 1023 en el aire (o en un suelo muy seco). Un suelo ligeramente húmedo daría valores típicos de 600-700. Un suelo seco tendrá valores de 800-1023.

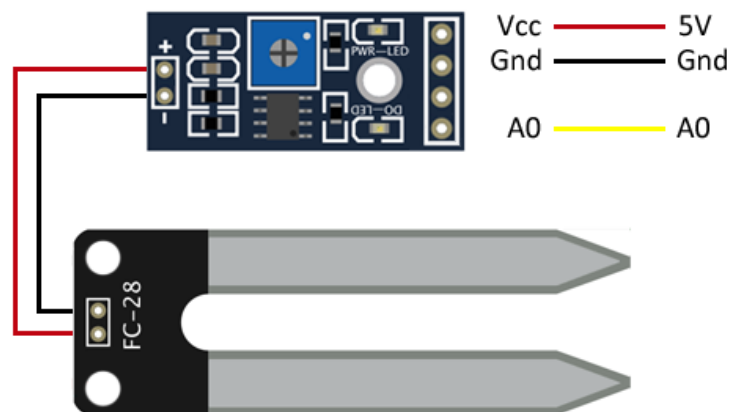


Figura 3-9 Sensor de humedad de suelo [41].

3.1.3 Sistema de Riego

Para conservar la humedad del suelo de las plantas en esta investigación se implementó una bomba de 5W a un voltaje de 12VDC, posee un caudal máximo de 240L/H, como se puede apreciar en la placa de información de la bomba que se muestra en el a figura 3-10.



Figura 3-10 Bomba de agua para riego (elaboración propia).

3.1.4 Sistema de Ventilación.

La temperatura y humedad presente en el prototipo se debe mantener constante en un valor deseado, para lograr este objetivo se implementó dos ventiladores ubicados de tal manera que uno de ellos permita extraer el aire del interior, mientras que el ventilador restante concede el ingreso del aire, esta configuración garantizará variar la temperatura y humedad, un ejemplo se puede apreciar en la figura 3-11.

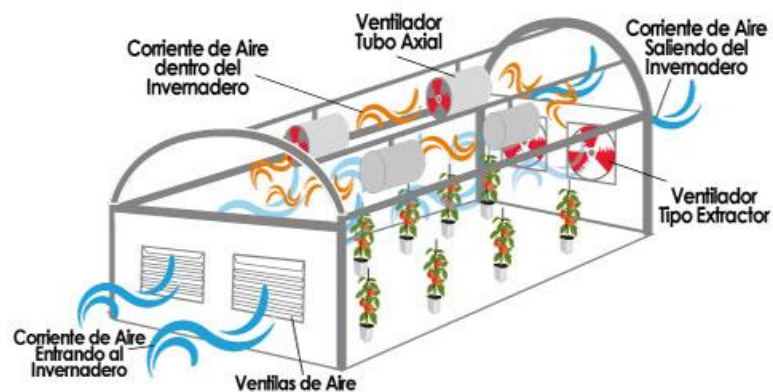


Figura 3-11 Sistema de Ventilación [42].

3.1.5 Sistema de Iluminación.

Este sistema es fundamental para el desarrollo del prototipo, ya que permite determinar las posibilidades bioagrónicas [43]. Este sistema consta de una lámpara led de luz roja y azul de 90W (figura 3-12), además de cuatro bombillas incandescente de 40W cada una (figura 3-13).

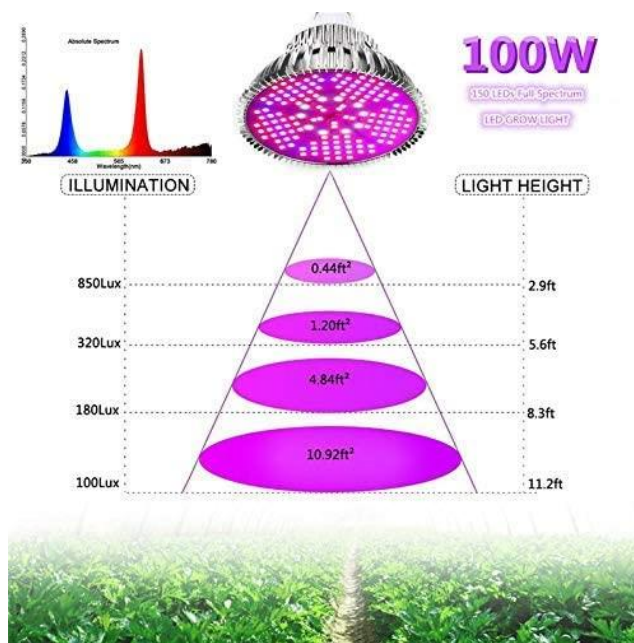


Figura 3-12 Lámpara Led [44].



Figura 3-13 Bombilla incandescente (elaboración propia).

La iluminación led mantiene un efecto especial para el crecimiento de plantas, ya que ofrece múltiples ventajas además del ahorro energético. El Cultivo interior mediante luz led da posibilidad de manipular el espectro de luz que reciben las plantas que están creciendo bajo focos led, aumenta exponencialmente la producción de los cultivos sin afectar la calidad respecto a otras formas de iluminación tradicional. Con este avance tecnológico resulta aconsejable sustituir los sistemas de iluminación fotosintética de lámparas incandescentes, por Leds que emiten espectros de manera separada. Los dispositivos LED consumen hasta 5 veces menos energía, poseen una vida útil mucho mayor y no generan exceso de calor dañino a las plantas. El caso de los Leds rojos, tienen una ventaja extra, que repelen los insectos disminuyendo el uso de tóxicos en los cultivos [45].

Para el proceso de fotosíntesis, todas las plantas utilizan rangos de longitud de onda (luz de crecimiento) de luz de 400nm hasta los 700nm. El espectro de la radiación recibida puede afectar tanto el crecimiento de la planta, como su floración; en algunas plantas puede afectar el sabor, olor e incluso el valor farmacéutico y nutricional. Esta irradiación fotosintética responsable de la excitación de la clorofila, es mayor en la franja roja del espectro que en la azul, de modo que los vegetales emplean de forma más eficiente la radiación de la región del rojo. La mayor parte de la luz solar que captan las plantas es convertida en calor y solamente la luz roja y azul es esencial para su crecimiento. El Cultivo interior led permiten eliminar aquellas longitudes de onda que son inactivas para la fotosíntesis [45].

En la figura 3-14 se puede apreciar el espectro luminoso visible o que se utiliza por el ser humano (B), por la planta (A), además se presenta la región en donde los espectros permiten el desarrollo óptimo de las plantas (C).

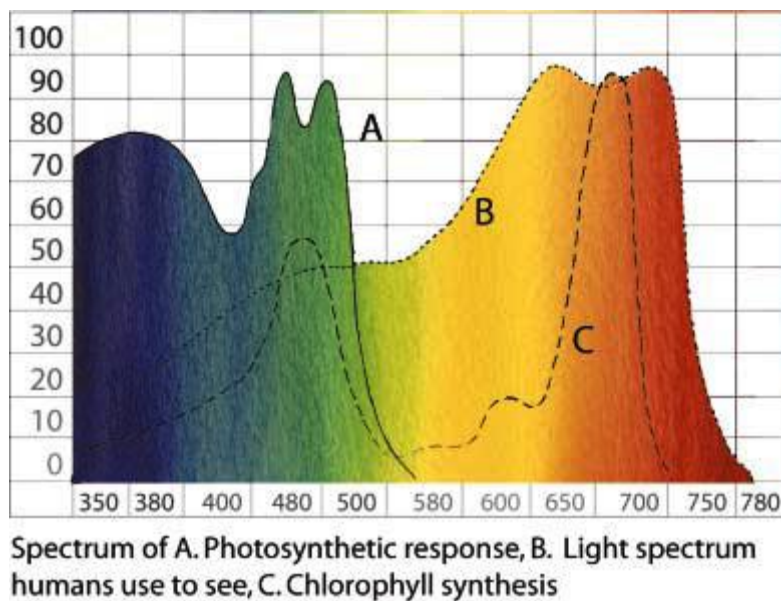


Figura 3-14 Espectro para la fotosíntesis de las plantas [45].

Según el color de la luz led se puede determinar que:

- **Leds Blancos:** permite la simulación de luminosidad.
- **Leds Rojos:** permiten simular rayos infrarrojos para el florecimiento de plantas.
- **Leds Azules:** aportan con rayos UV para el crecimiento de las plantas.

Un sistema de iluminación tradicional es únicamente de color amarillo, para obtener un sistema de iluminación optimo dependerá de la mezcla de color rojo o azul.

Las tecnologías de iluminación utilizadas hasta el momento para cultivos han sido poco eficientes. Las luminarias tradicionales de alta presión de Sodio, Halogenuros metálicos, Fluorescentes y fluorescentes compactos, son mucho menos eficientes energéticamente y lumínicamente que las luminarias LED. Sólo alrededor del 35% de la potencia y el 10% de la luz emitida de halogenuros metálicos es utilizada por las plantas; en caso de las luces LED el 90% de la luz de las lámparas puede ser absorbido por las plantas [45].

3.2 Diseño de Circuitos.

3.2.1 Circuitos de Potencia.

La sección de electrónica de potencia se encuentra separada físicamente del prototipo, esto con el fin de protegerlos contra la humedad del interior.

- **Sistema de Iluminación.**

Para el control de las lámparas led se utilizó un sistema de potencia mediante PWM, este circuito se realizó mediante el uso de un opto acoplador y un triac tal como se muestra en la figura 3-15.

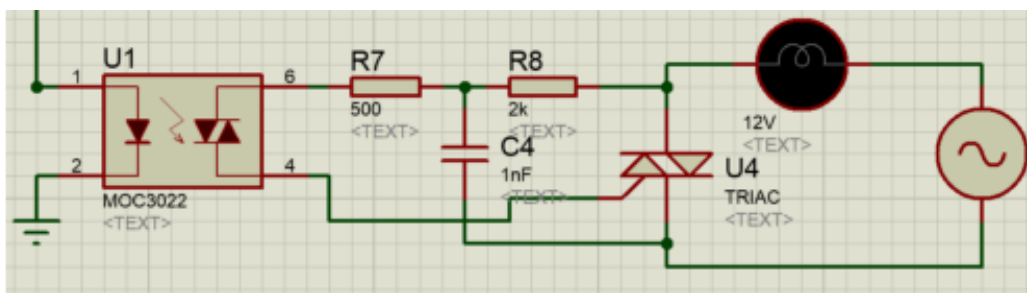


Figura 3-15 Circuito PWM de lámparas LED (elaboración propia).

- **Sistema de Ventilación.**

Los ventiladores que se usaron para esta investigación son de 12VDC con una potencia de 4.5W, poseen una velocidad que oscila entre los 3000 rpm, al igual que el circuito anterior se manejará los ventiladores por señal PWM, en vista de la factibilidad de diversos circuitos económicos y eficientes existentes en el mercado, se optó por el uso de módulos puente H basados en el integrado L298N.

El circuito "Puente-H" se deriva de la representación gráfica típica del circuito. Un Puente-H, se construye mediante el uso de interruptores (mecánicos o de estado sólido), uno en cada "rama lateral" o brazo ascendente y descendente y en la barra central, se encuentran las salidas para el motor, es la forma que se representa dentro de un circuito esquemático simplificado, tal como se muestra en la figura 3-16.

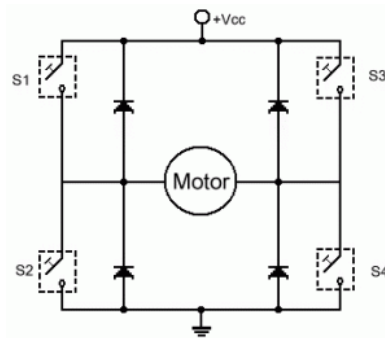


Figura 3-16 Esquema de un circuito Puente H [46].

En cuanto al L298, es un integrado con dos puentes H que maneja hasta 2A, que integra dos etapas (A, B) de salida de potencia. La etapa de potencia de salida es una configuración en puente y sus salidas pueden conducir una carga inductiva en modo común o diferencial, dependiendo del estado de las entradas tal como se puede apreciar en la imagen 3-17.

Nota: se deben retirar los jumpers ENA, ENB y CON5

Giro	Dir A1	Dir A2
Horario	1	0
Antihorario	0	1
Motor detenido	0	0

Driver PWM
Puente H
L298N

Figura 3-17 Módulo Puente H L298N [47].

- **MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO O PWM.**

La modulación por ancho de pulso o PWM, es una técnica ampliamente utilizada en circuitos electrónicos de potencia y consiste en controlar la relación entre el Tiempo de Encendido (ton) y el periodo (T), también conocido como Ciclo útil (o Duty Cycle) de una onda cuadrada sin alterar su frecuencia, un ejemplo se puede apreciar en la figura 3-18.

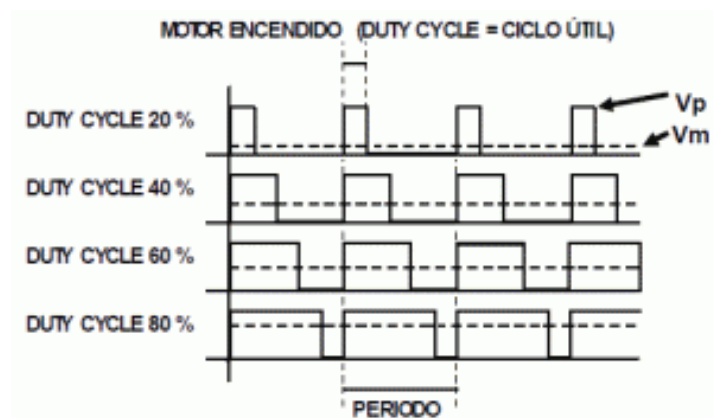


Figura 3-18 Modulación por ancho de pulso [46].

- **Sistema de Calefacción.**

Este sistema es el encargado de generar una temperatura estable para el crecimiento de la planta, para generar una temperatura constante al interior del prototipo de invernadero, se usaron las bombillas del tipo incandescentes debido a parte de generar luz produce calor debido a esto se concluye que el 90% de electricidad se utiliza para producir calor y únicamente el 10% se usa para emitir luz, estas bombillas serán controladas de forma lógica mediante el encendido y apagado, mediante el uso de un relevador al cual se puede observar en la figura 3-19; la temperatura a mantener en el interior del prototipo se consideraron valores entre los 14°C y 18°C.

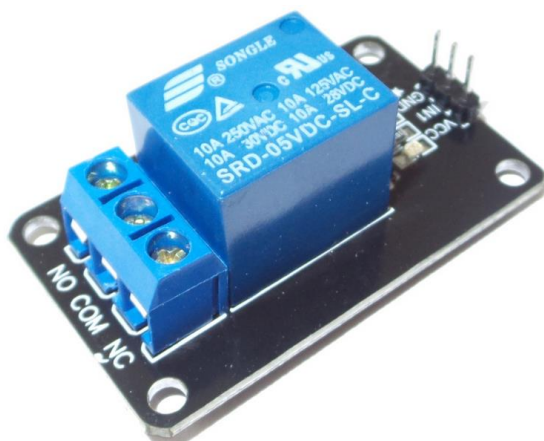


Figura 3-19 Módulo Relevador [48].

Este módulo funciona mediante el circuito que se puede visualizar en la figura 3-20, en donde se puede encontrar un optoacoplador, que posee una entrada de dos pines que conectan a un led (diodo emisor de luz) y una salida de dos pines que conectan a un fototransistor. El encendido del led pone en conducción al fototransistor, lo que cierra circuito entre su colector y su emisor. Lo importante del funcionamiento es que no hay contacto eléctrico entre entrada y salida. El único contacto es la luz emitida por el led, lo que implica una aislación muy elevada entre entrada y salida (en el

orden de los 5000V), protegiendo las entradas (en este caso conectadas a un microcontrolador) ante cualquier riesgo de alto voltaje producido en el área de salida.

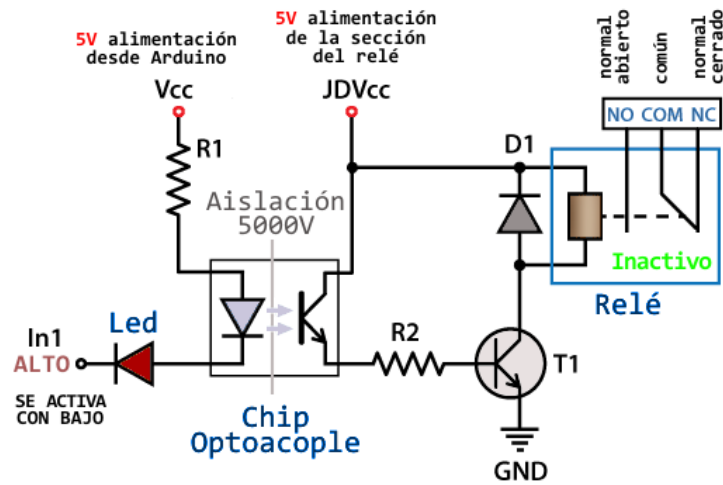


Figura 3-20 Circuito Potencia Relevador [48].

3.3 Diseño de la Estructura.

El diseño general del prototipo se realizó mediante el uso de un software de diseño asistido por computador (CAD) SolidWorks 2020, este software permitió obtener un modelo aproximado al prototipo físico implementado. El modelo que se obtuvo se muestra en la figura 3-21.

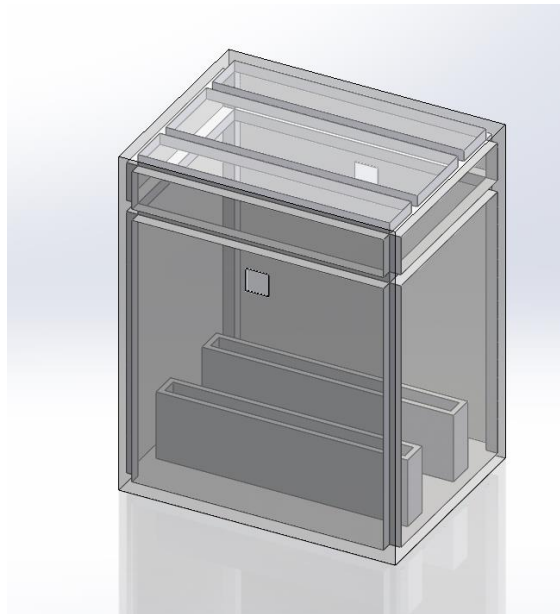


Figura 3-21 Modelo 3D del prototipo (elaboración propia)

El área de trabajo está detallado en la figura 3-22, la misma que se visualiza desde una vista superior, en el centro se ubica un cuadro de color rojo en donde se instalarán las lámparas led en la parte superior, en la parte inferior del mismo cuadro

rojo se encuentra el sensor de iluminación, en los recuadros azules se pondrá las plantas así como las canaletas que contendrán la tierra y el sistema de drenaje, de igual forma en este espacio estarán los sensores Fotorresistor, el cuadro verde es el espacio total del prototipo.

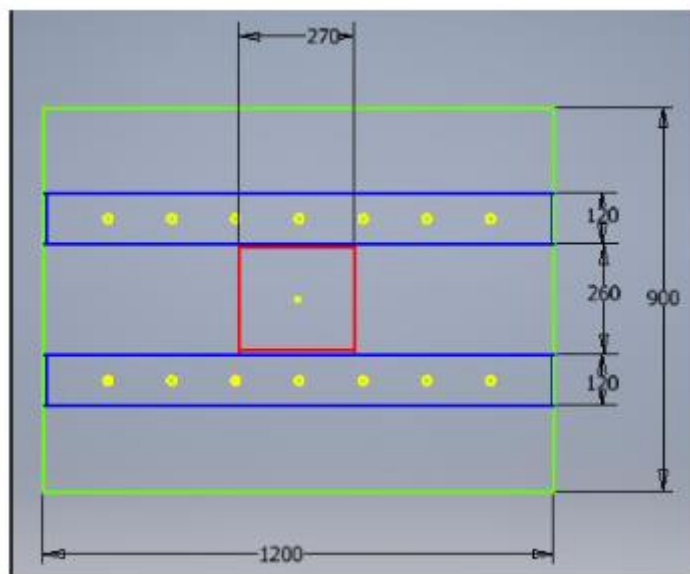


Figura 3-22 Espacio de trabajo del prototipo (elaboración propia).

3.4 Sistema de Control.

En la figura 3-23 se puede observar el esquema general del sistema de control para el manejo del sistema de iluminación artificial en un cultivo de orquídeas.

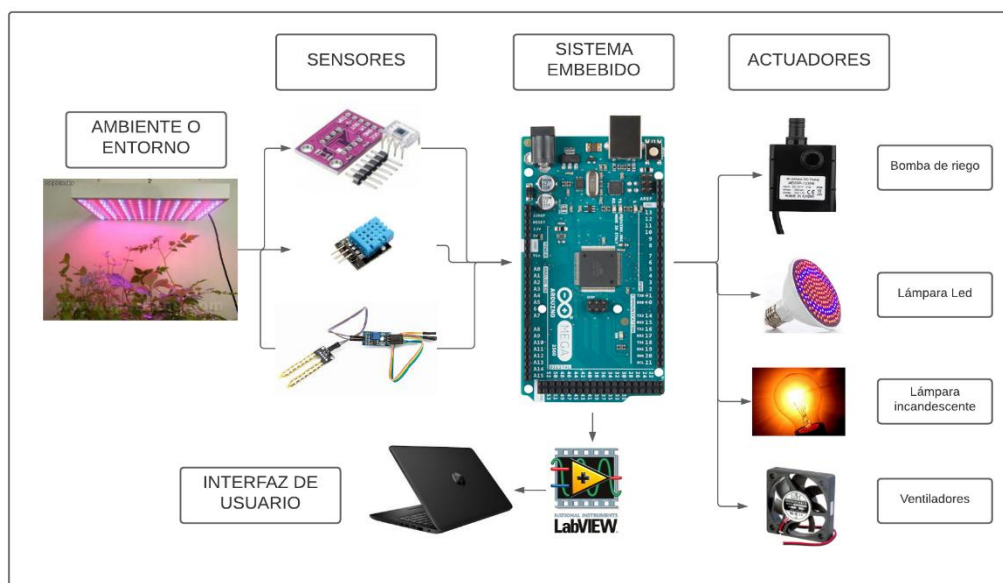


Figura 3-23 Esquema General (elaboración propia)

Una manera óptima de visualizar cada uno de los sistemas que componen esta investigación, es mediante el uso de un diagrama de funciones como se muestra en la figura 3-24, de esta manera se puede observar los datos adquiridos por los sensores para monitorear el estado del cultivo, el sistema de control envía señales a los diferentes actuadores mediante el uso de los circuitos de potencia, estas señales afectan las variables que se desean controlar.

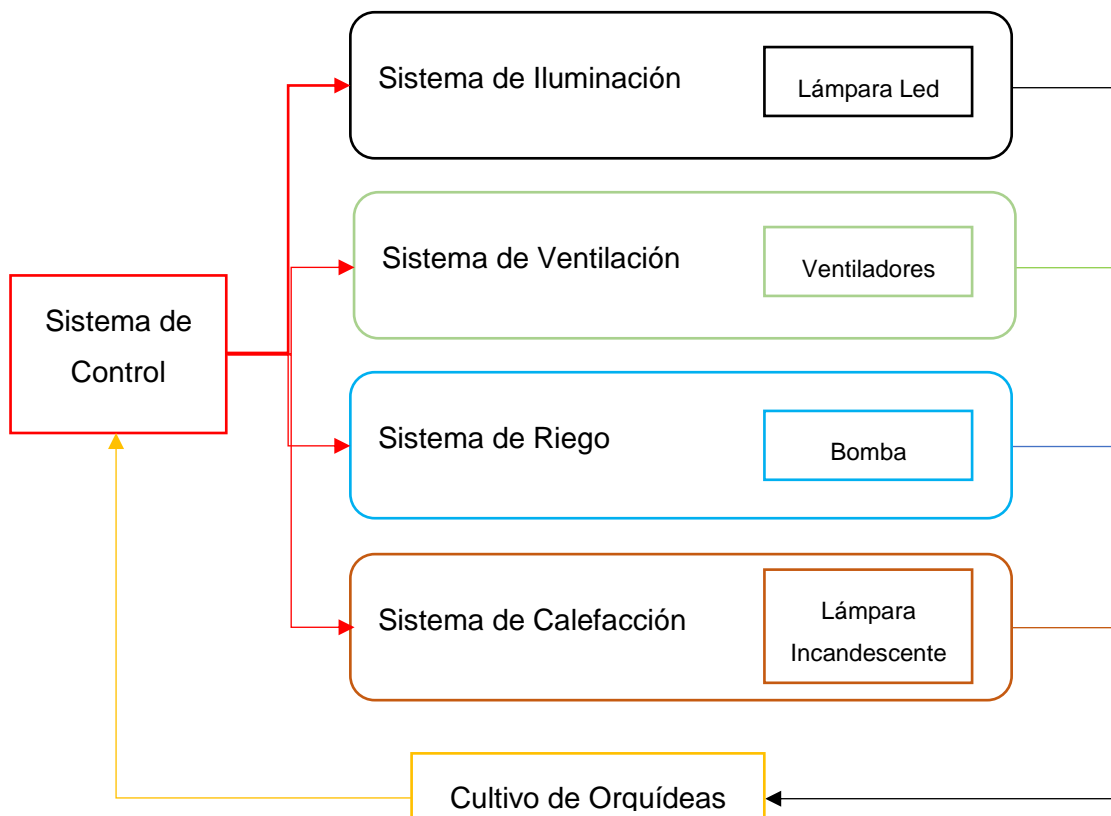


Figura 3-24 Diagrama de Bloques (elaboración propia)

3.5 Estrategias de Control

La implementación de un sistema de control avanzado en cualquier planta de producción es implementada con el fin de aumentar la productividad, permitiendo con estas técnicas otorgar estabilidad, seguridad y beneficios económicos.

El objetivo de un sistema de control es que se logre a partir del estudio de un proceso, determinar la arquitectura y los parámetros de un regulador de forma que cuando se presente un cambio deseado o imprevisto en su funcionamiento, sea capaz de adaptarse automáticamente de la manera más óptima posible, tomando en cuenta la velocidad y la dinámica con las que el proceso se ajuste a las nuevas condiciones determinadas mediante el ingreso de parámetros y de sistemas para el controlador.

En esta investigación se tiene un sistema de control con entradas, procesos que se realizan a estas entradas y una salida final tal como se puede observar en la figura 3-25, el proceso será la acción del sistema para mantener o controlar una variable que se encuentren en el rango del umbral requerido, para esto se utilizará el esquema entrada, proceso, salida.



Figura 3-25 Diagrama general de un sistema de control (elaboración propia)

Para generar las condiciones ambientales óptimas al interior del prototipo, se debe tener en cuenta las variables físicas que se automatizaran, las mismas que son: temperatura, humedad relativa, ventilación ambiental y la que se considera de mayor importancia, la luminosidad.

En esta investigación se ha optado por dividir al sistema de control en subsistemas con el esquema mostrado en la figura 3-26, el mismo que de manera general está relacionado con las variables físicas en el control automático, mediante un lazo cerrado lo que quiere decir que se realiza la comparación de las variables de salida y entrada.

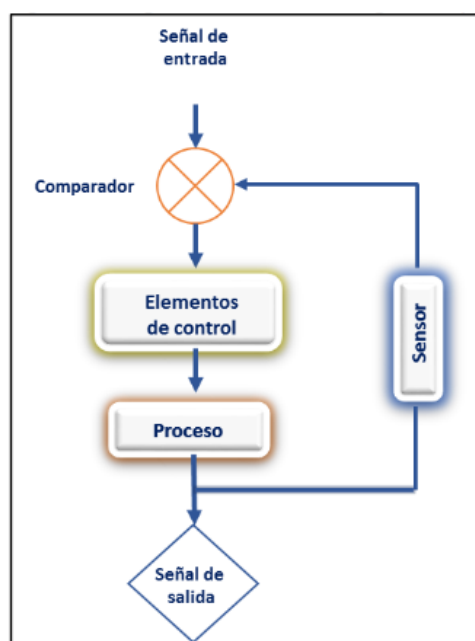


Figura 3-26. Subsistema con lazo cerrado.

El subsistema antes mencionado realiza una comparación entre el valor real que posee la magnitud física de la variable de salida con el valor que se asignó mediante el comparador y un lazo cerrado, luego modifica la magnitud regulada cuando existe un tipo de desviación.

3.5.1 Subsistema de control de temperatura.

Este subsistema está encargado de controlar las altas temperaturas al interior del prototipo, el objetivo principal es evitar incrementos bruscos de temperatura para evitar el daño de los actuadores y el cultivo, para lograr esto se realiza la activación y desactivación del sistema de calefacción y el sistema de ventilación.

En la figura 3-27 se puede apreciar el diagrama del subsistema de control de temperatura.

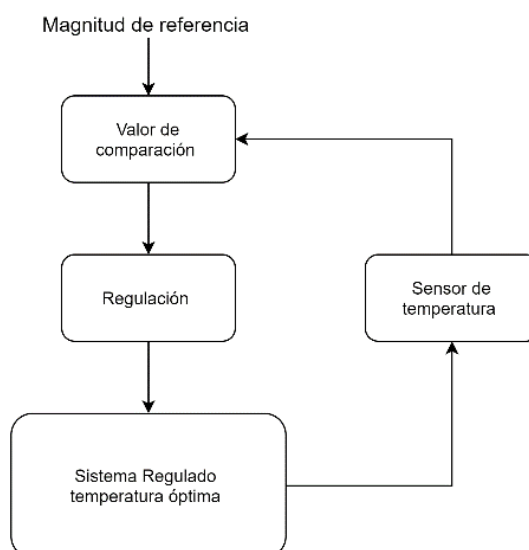


Figura 3-27. Subsistema de control de Temperatura (elaboración propia).

En subsistema antes mencionado, el dato de temperatura al interior del prototipo es la salida, esta lectura se transmite al dispositivo de regulación en donde se compara con un valor establecido, si este valor es superado se crea una perturbación provocando que funcione el dispositivo que permitirá que el dato retorne a su valor.

3.5.2 Subsistema de control de humedad.

Este subsistema permite mantener la humedad relativa ambiente en el interior del prototipo en el rango de los parámetros prefijados óptimos para el cultivo de Orquídeas, para lograr este objetivo este subsistema enciende y apaga los sistemas de ventilación, de igual manera se mantiene la humedad del suelo mediante un sistema de riego.

3.5.3 Subsistema de control de iluminación.

Este subsistema tiene por objetivo el control del suministro de iluminación artificial para los cultivos, como se ha mencionado anteriormente en esta investigación, el sistema de iluminación consta de una lámpara led de color rojo y azul, estas se controlarán mediante un modulador de ancho de pulso PWM, cuya variación está en el rango de los 0-255 bits generados por un pin del sistema embebido.

Para determinar un modelo matemático que permita una condición de trabajo óptimo, se realizaron pruebas de manera experimental en donde se varió el PWM y se obtuvieron datos del sensor óptico OPT101, estos datos se manejaron en función de voltajes, los resultados se pueden observar en la figura 3-28.

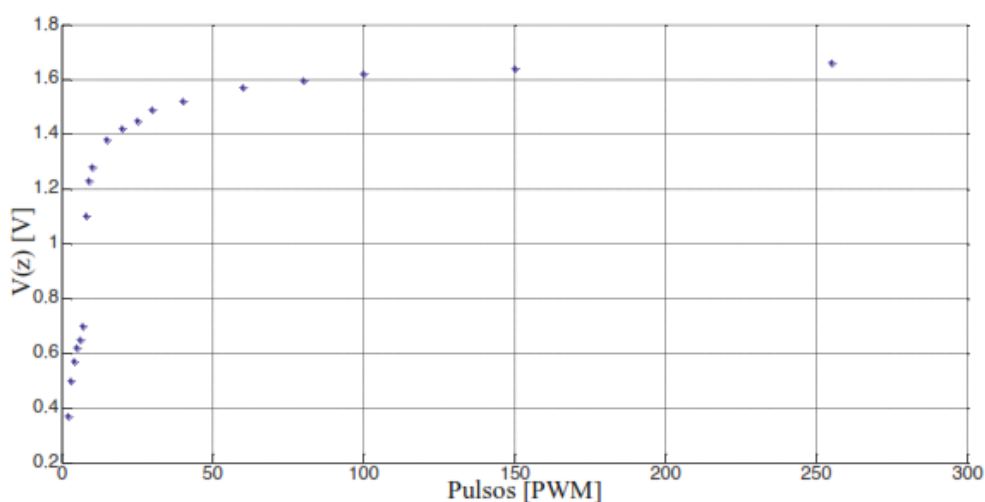


Figura 3-28 Resultados experimentales del Sistema de Iluminación (elaboración propia)

Con la información obtenida anteriormente se aplicó el método de mínimos cuadrados que dio como resultado el siguiente resultado:

$$G(t) = \frac{V(z)}{P(z)} = \frac{0.0032}{z - 0.7389} \quad (1)$$

En donde:

- $V(z)$ es el voltaje obtenido del sensor OPT101
- $P(z)$ es la señal PWM.

Para obtener la ecuación (1) se utilizó la herramienta de identificación del software Matlab que se puede observar en la figura 3-26

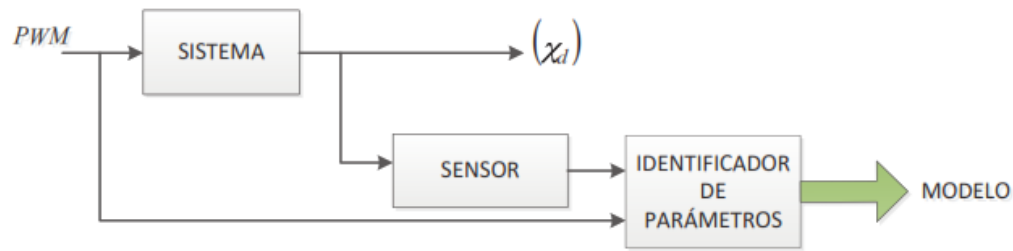


Figura 3-29 Identificador del modelo (elaboración propia)

El sistema de control que se implementó es un PID predictivo, un PID discreto se describe en la ecuación (2).

$$PID = Kp \left(1 + \frac{1}{TiS} + Tds \right) \quad (2)$$

Este controlador establece su desempeño con señales de control o también conocidas como señales de mando indicando así las constantes que determina su comportamiento como se muestra en la ecuación 3.

$$u(t) = Kpe(t) + \frac{Kp}{Ti} \int e(t)dt + KpTd \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

El control PID es el más usado en aplicaciones industriales, sin embargo, este tipo de controladores posee desventajas en procesos con fuerte retardo, procesos no lineales, entre otros.

En esta investigación se pretende diseñar un PID predictivo, el control predictivo presenta mejores prestaciones mediante la capacidad de adaptarse a procesos no lineales, sin embargo, en la mayor parte de los casos el control predictivo requiere de una plataforma adecuada para su implementación.

La sección integral en un PID es importante en el lazo de control también aparece en sistemas de control predictivo basado en modelos, siendo este uno de los más usados a nivel industrial el Control Predictivo Generalizado, el cual presenta la ventaja que la acción integral elimina el offset o error con datos de predicción.

La ecuación (4) muestra un control PID predictivo, la cual se obtuvo mediante las matrices de un sistema de control predictivo basado en modelos.

$$u(n) = Kpe_1(n) + K_i T \sum_{k=1}^n e_1(n) + \frac{K_D}{T} [e_1(n) - e_1(n-1)] \quad (4)$$

En donde $e_1(n)$ se puede obtener mediante la discretización de la señal desde el valor $e(t)$, mediante el uso de un convertidor Analógico Digital, la salida final se

convierte en una señal del tipo analógica mediante el uso de un convertidor Digital Analógico, es el tiempo de muestreo.

Para los sistemas que poseen un tiempo de retardo de T segundos, es de gran beneficio el predecir valores que siguen de $e(t)$, este valor se puede utilizar mediante el convertidor Digital Analógico por consiguiente se elimina el efecto del retardo de tiempo, sin embargo, se pueden producir errores ya que se usa un valor predicho en lugar de un valor real, por consiguiente, se propone un modelo de controlador predictivo lineal, el cual se muestra en la ecuación (5).

$$e(n) = e(n - 1) + [e(n - 1) - e(n - 2)] \quad (5)$$

Si la ecuación (5) se reemplaza en la ecuación (4) se puede obtener el controlador PID predictivo.

$$u(n) = K_p \left[2e_1(n - 1) - e_1(n - 2) + K_i' \left[\sum_{k=1}^n e_1(k) + 2e_1(n - 1) - e_1(n - 2) \right] + K_D' [e_1(n - 1) - e_1(n - 2)] \right] \quad (6)$$

En donde:

- $K_i' = K_i T$
- $K_D' = K_D T$

La transformada z del controlador que se propone en este documento es:

$$\frac{U(z)}{E_1(z)} = \left[K_p \left(\frac{2z - 1}{z^2} \right) + K_i' \left(\frac{3z^2 - 3z + 1}{z^2(z - 1)} \right) + K_D' \left(\frac{2z - 1}{z^2} \right) \right] \quad (7)$$

Esta ecuación (6) genera un polo en el origen debido al tiempo de retardo T .

Para los sistemas que poseen un tiempo de retardo T en el lazo de control, ya sea que este causada por cálculos en el controlador o ya sea por retardos originados en la planta en conjunto con el sensor, este tiempo de retardo puede considerarse que se produzca a la entrada del controlador, por consiguiente, la entrada al controlador en la ecuación (6) es $e_1(n - 1)$, esto supone una ventaja del controlador PID predictivo.

3.6 Interfaz de usuario

La interfaz permite al usuario introducir los diferentes parámetros de entrada que dictarán el funcionamiento del sistema de iluminación del invernadero. A su vez la interfaz aporta la información sobre el estado de la iluminación durante su ejecución, siendo esta información generada por el sistema mediante la adquisición de la señal del sensor de iluminación y el procesamiento de esta señal.

La interfaz ofrece flexibilidad para adaptar el control a diferentes tipos de cultivo y además permite visualizar en tiempo real mediante gráficas las variables en el

funcionamiento del sistema, como son la energía lumínica por ser absorbida, la cantidad de luz irradiada en el tiempo transcurrido del ciclo actual, el tiempo y el número de ciclos, entre otros. Otra de las características fundamentales es que permite seleccionar, mediante simplemente un botón, el algoritmo a utilizar (Predictivo o PD) en el proceso de control y, adicionalmente, los parámetros propios de cada algoritmo.

El software utilizado para el desarrollo de la interfaz de usuario fue LabVIEW 2019 con una versión estudiantil, este software nos permite crear instrumentación virtual a medida creando interfaces gráficas de usuario con las que se puede controlar el hardware seleccionado, analizar los datos adquiridos y visualizar los resultados, entre otras características. La aplicación se diseñó partiendo de unos requisitos que quedan reflejados en la figura 3-27.

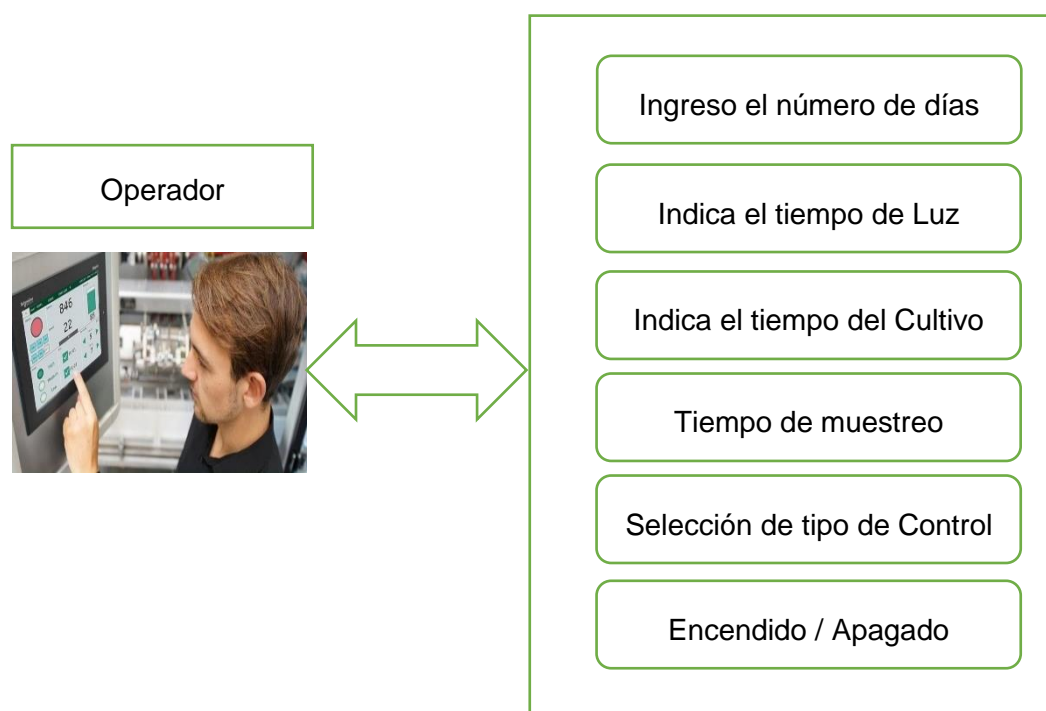


Figura 3-30 Esquema de Interfaz de Usuario (elaboración propia)

Una vez determinados los requisitos necesarios para la interfaz, se procedió a realizar un HMI, en donde se debe seleccionar en primer lugar la comunicación serial es decir se debe seleccionar el puerto USB asignado para la placa Arduino en el computador, luego se debe ingresar el tiempo en horas o minutos que el cultivo va a estar expuesto a la iluminación artificial, de igual manera el número de días que el cultivo va a estar expuesto al sistema de iluminación artificial, un detalle de vital importancia es el ingreso del la cantidad mínima que necesita el cultivo en este caso

las orquídeas, como visualizador se tiene cuatro gráficas en tiempo real del comportamiento del sistema de iluminación artificial mediante el análisis de la distribución de energía luminica desea, la energía luminica absorbida necesaria, el comportamiento del actuador para la emanación de la energía luminica y la energía luminica absorbida, estos parametros los podemos observar en la figura 3-31.

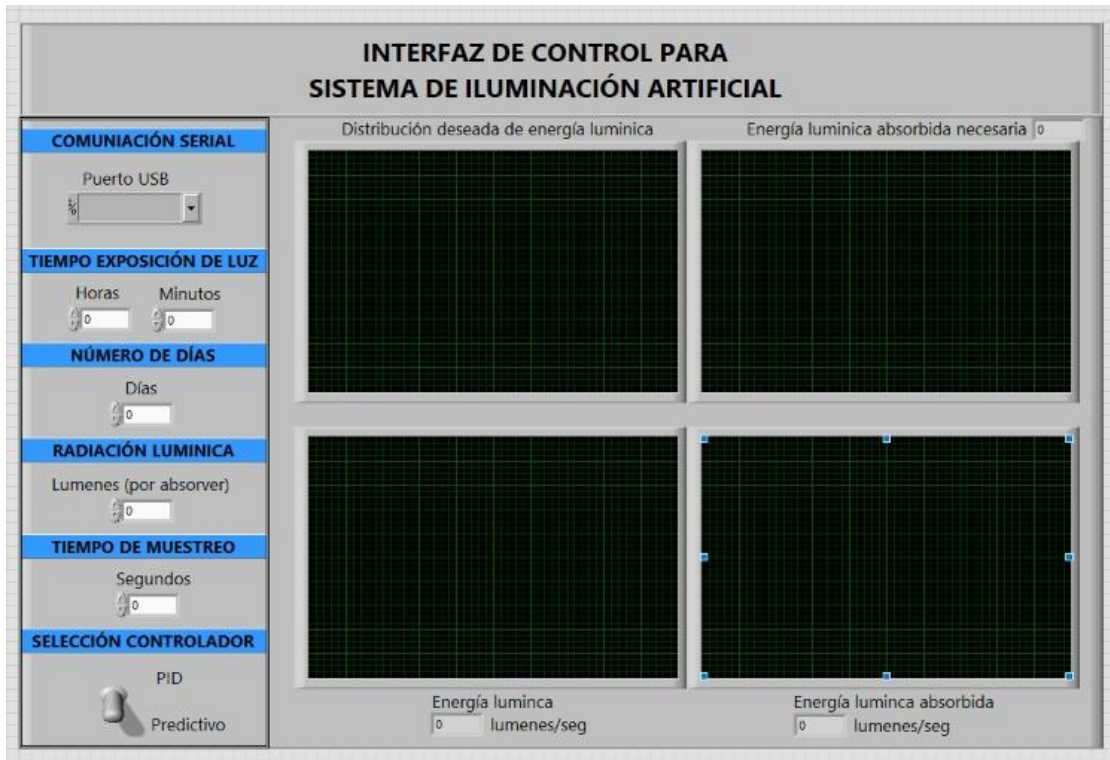


Figura 3-31. Interfaz de control (elaboración propia)

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados y lograr las diferentes fases de crecimiento del cultivo, se ha considerado cuatro factores: temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y luz, para que las plantas puedan realizar sus funciones es necesaria la conjunción de todos estos factores enmarcados por unos límites mínimos y máximos, fuera de estos las plantas cesan en su metabolismo pudiendo incluso provocar la muerte de todo el cultivo.

4.1 Temperatura.

Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada, en este caso específico se trata de orquídeas, en general, las orquídeas más habituales de las familias *Cattleya*, *Cymbidium*, *Miltonia*, *Oncidium*, *Paphiopedilium*, *Phalaenopsis*, *Cambrias*, *Vandas*, etc. Necesitan temperaturas mínimas no inferiores a 9 o 10°C. Respecto a las máximas diurnas no deberían sobrepasar los 30°C.

Con estas consideraciones se ha definido los siguientes conceptos:

- Temperatura mínima letal. – es aquel valor de temperatura que por debajo de su valor producen daños en la planta.
- Temperatura máxima y mínima biológica. – son aquellos valores que indican los rangos superior e inferior respectivamente del cual no es posible que la planta alcance una fase vegetativa como floración, fructificación, etc.
- Temperaturas nocturna y diurna. – indican valores aconsejados para que la planta tenga un correcto desarrollo.

Estas temperaturas se muestran en la tabla 4-1

T. mínima letal	9°C
T. mínima biológica	13°C
T. óptima	18°C
T. máxima biológica	22°C
T. máxima letal	30°C

Tabla 4-1. Temperaturas requeridas para Orquídeas.

4.2 Humedad relativa.

Es la masa de agua en unidad de volumen o en unidad de masa de aire. La humedad relativa es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura [49], en este caso en específico la Orquídea no requiere de un entorno demasiado húmedo, por lo general se tiene un rango del 50-60%.

La HR del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse, además de los comunes problemas de mal cuaje.

4.3 Humedad del suelo.

El suelo ideal para el cultivo de orquídeas debe tener buen drenaje, buena capacidad de retención de agua y una adecuada porosidad, para que las raíces puedan penetrar con facilidad ya que éstas son carnosas y fasciculadas. El pH debe estar en torno a 5-6.

Las Orquídeas requieren riegos regulares, de forma que se mantenga siempre húmedo el sustrato, evitando los encharcamientos, la frecuencia de riego varía en función de la temperatura y la luz, siendo mayor ésta cuando ambos parámetros aumentan y viceversa. Así mismo, requieren que el ambiente permanezca húmedo.

La calidad del agua es de especial importancia, ya que el exceso de sales bloquea la absorción de nutrientes. Por lo general, requieren aguas con pH cercano a la neutralidad.

4.4 Iluminación.

Cuanto mayor sea la luminosidad al interior del prototipo, se debe aumentar la temperatura, la humedad relativa y la humedad del suelo con el afán de que la fotosíntesis sea máxima, si por el contrario la iluminación es baja la necesidad de los otros factores puede disminuir, la Orquídea es muy exigente en cuanto a la luminosidad, el rango óptimo oscila entre los 20-45000 lux. Un Lux (lx) es la unidad de medida para la iluminancia o nivel de iluminación en el Sistema Internacional. Un Lux equivale a un $lumen/m^2$, por ejemplo, la luz del sol promedio varía entre los 32000 lux y los 100000 lux; bajo los reflectores de los estudios de televisión se tiene unos 1000 lux, en una oficina iluminada se tienen unos 500 lux, la luna tiene 1 lux.

Con el fin de analizar el comportamiento y funcionamiento del sistema de iluminación artificial, se realizó diferentes pruebas usando un algoritmo de control P, PD y un PID Predictivo, se tomó en cuenta el comportamiento de la energía lumínica distribuida en periodos de luz, para realizar la comparación se hizo uso de una forma de campana Gaussiana así como forma acumulada, tal como se puede apreciar en la figura 4-1.

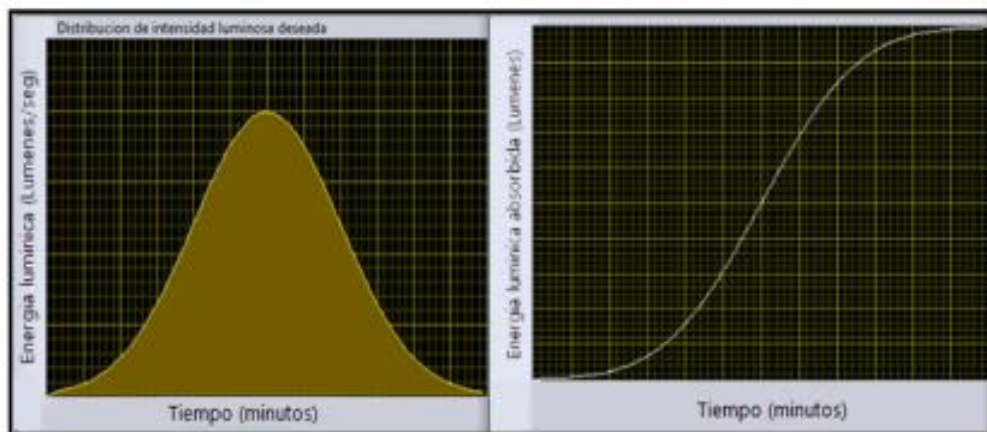


Figura 4-1. Campana Gaussiana de la distribución de energía (elaboración propia).

Las pruebas experimentales que se realizaron en esta investigación, se resumen en la tabla 4-2, para el PID predictivo se tomaron valores de $K = 0.22$, $T_i = 0.63$ y $T_d = 0$; se implementaron tres pruebas en donde se varió la ganancia y el tiempo integral (T_i) para conseguir una mejor respuesta; como indicador de medición se utilizó el error cuadrático.

Indicador	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Error Cuadrático	21359 lúmenes	39888 lúmenes	43254 lúmenes

Tabla 4-2. Pruebas de PID Predictivo (elaboración propia)

La prueba 1 posee un menor error cuadrático, lo que significa que se obtuvo una mayor precisión sobre la variable controlada, sin embargo, presenta una mayor fluctuación en el actuador (lámparas led) a comparación de las pruebas 2 y 3, esto se puede observar en las figuras 4-2, 4-3 y 4-4.

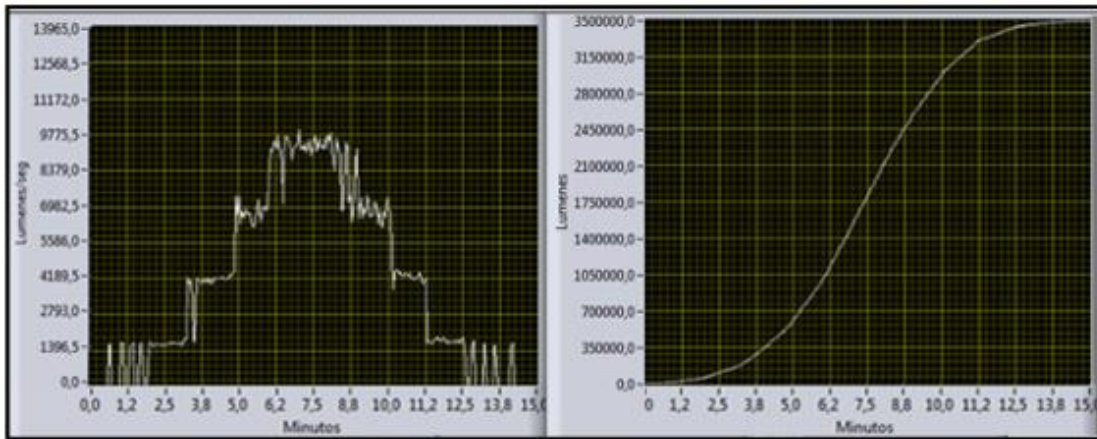


Figura 4-2. Resultado de la Prueba 1 Control Predictivo (elaboración propia).

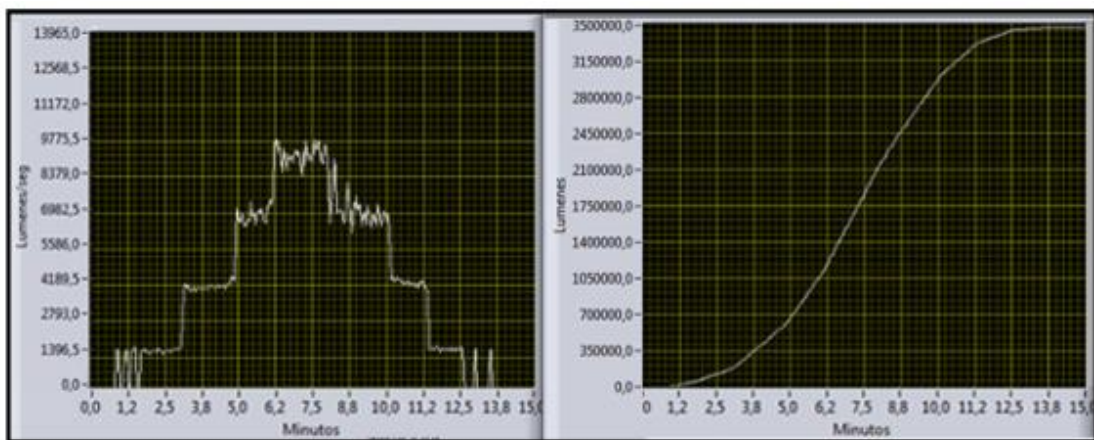


Figura 4-3. Resultado de la Prueba 2 Control Predictivo (elaboración propia).

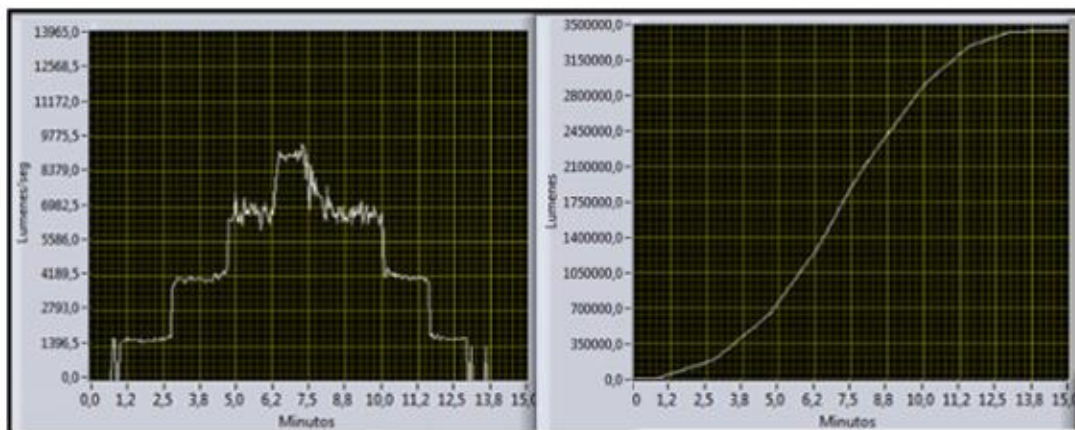


Figura 4-4. Resultado de la Prueba 3 Control Predictivo (elaboración propia).

Para obtener un rendimiento del PID Predictivo, se comparó con un algoritmo de control PD en donde se realizaron dos pruebas, tal como se puede observar en la tabla 4-3.

Indicador	Prueba 1	Prueba 2
K	0,07	0,03
Td	0,07	0
Error cuadrático	34565 lúmenes	36293 lúmenes

Tabla 4-3 Parámetros de PID (elaboración propia)

Para la prueba 2, el valor de Td es cero; implementado así, un controlador P tradicional, se puede observar que el controlador PD en la prueba 1 posee un error cuadrático del 5% aproximadamente inferior al controlador P de la prueba 2, sin embargo, esto no permite concluir que uno sea más preciso que el otro ya que el resultado va a variar en función de los parámetros de ingreso.

Los controladores PD, P presentaron fluctuaciones notables en comparación con el algoritmo de control predictivo, tal como se puede observar en la figura 4-5 y 4-6.

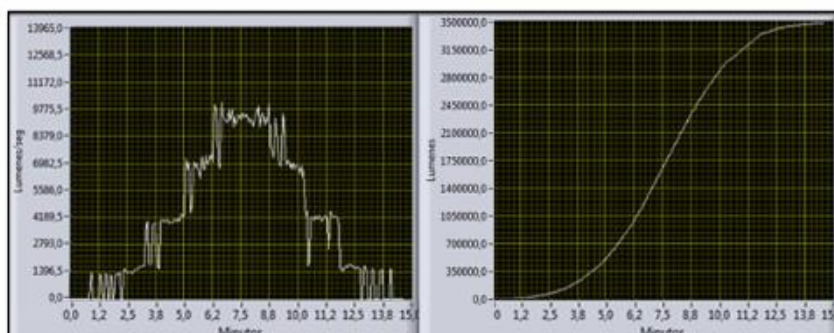


Figura 4-5. Resultado de la prueba 1 Control PD (elaboración propia).

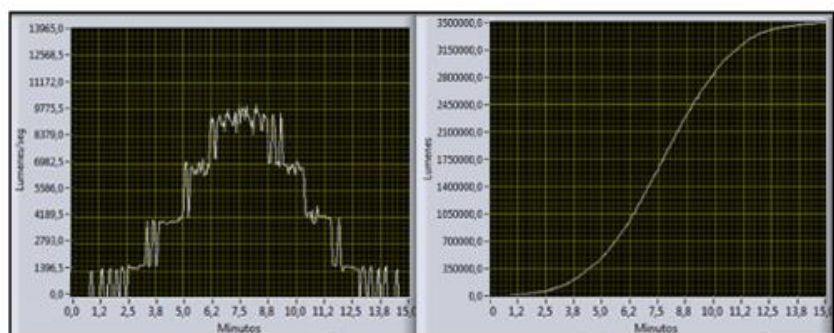


Figura 4-6. Resultado de la prueba 2 Control P (elaboración propia).

El controlador predictivo presenta un comportamiento estable al analizar las fluctuaciones, esto debido a que se anticipa a los cambios en tiempos futuros

generando así señales de salida en el presente que permiten amortiguar dichos cambios de manera más suave; además al comparar el error cuadrático de las pruebas realizadas bajo las mismas condiciones con todos los controladores, se puede notar que el controlador predictivo posee un error del 38% inferior a un controlador PD, esto permite obtener una mayor precisión sobre la variable que se va a controlar, esta comparación permite concluir que el control predictivo se ajustó de manera óptima y eficiente al sistema de control artificial para el cultivo de orquídeas.

El prototipo está especializado en el cultivo de orquídeas, en donde una temperatura se tiene una temperatura diurna de 22 ° C y una temperatura nocturna de 17 ° C, las cuales son óptimas para el crecimiento de las raíces y el desarrollo de las plantas, el requisito de humedad relativa adecuada varía entre el 50% y el 60%, y la intensidad de luz mínima requerida por la fotosíntesis es de 5500 lux en la superficie de la planta con un fotoperíodo de 20 horas. Por lo tanto, la carga de iluminación artificial esperada debe llegar a 2,2 kW de 12:00 a.m. a 3:00 a.m. y de 6:00 p.m. a 12:00 a.m. donde el cultivo necesita iluminación artificial para completar su fotoperíodo. Además, considerando que las orquídeas necesitan al menos 0,37 m² por planta, y teniendo en cuenta que cada planta necesita 2,7 L de agua por día, se supone que la bomba es igual a 0,025 [m³] en el primer intervalo (15 min) de cada hora. También está prevista la protección contra el funcionamiento en seco de la bomba de agua local. Por lo tanto, un sistema de protección debe garantizar un nivel mínimo del 20% de la capacidad del depósito.

CONCLUSIONES

El proceso de automatización agrícola es una buena inversión para cualquier cultivo en distintas partes del mundo, permitiendo mejorar la calidad del cultivo, reducción de los costos de producción.

La infraestructura que se diseñó e implementó demostró ser útil para contener al cultivo junto a los respectivos sistemas de control, los sistemas de ventilación permitieron lograr un correcto intercambio de energía entre el interior y el exterior del sistema controlado, además permitió modificar la temperatura y humedad.

El control de las variables como: temperatura, humedad y luminosidad, permite a una persona monitorear en tiempo real el estado del cultivo, logrando así una mejor calidad del producto y permitiendo realizar modificaciones al interior del prototipo con el menor esfuerzo, para esto se desarrolló una interfaz de usuario mediante el uso de LabVIEW, la que es muy intuitiva y que permite seleccionar el modo de control, así como ingresar los parámetros para el cultivo y extraer datos en tiempo real.

El prototipo consta de dos estrategias de control: PD y un Predictivo, el controlador predictivo se considera una estrategia muy avanzada en el caso de los procesos lineales permitiendo su uso con total éxito en la industria agropecuaria.

Al comparar los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas se pudo notar que el control predictivo generó un número menor de fluctuaciones en el encendido y apagado de las luminarias led, esto influye directamente en la vida útil de las mismas.

El sistema de iluminación artificial propuesto puede suponer un ahorro en el consumo de energía en los invernaderos, esto se logra entregando solo la cantidad específica de energía indicada en los parámetros de funcionamiento en la interfaz de usuario, además de simular la luz natural el sistema propuesto mejora la calidad y el tiempo de producción del cultivo mediante el uso de diferentes colores de iluminación.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En investigaciones futuras es preciso el estudio con cultivos extenso y de manera real en un invernadero, con el fin de analizar el ahorro energético y maximizar el crecimiento de todo el cultivo.

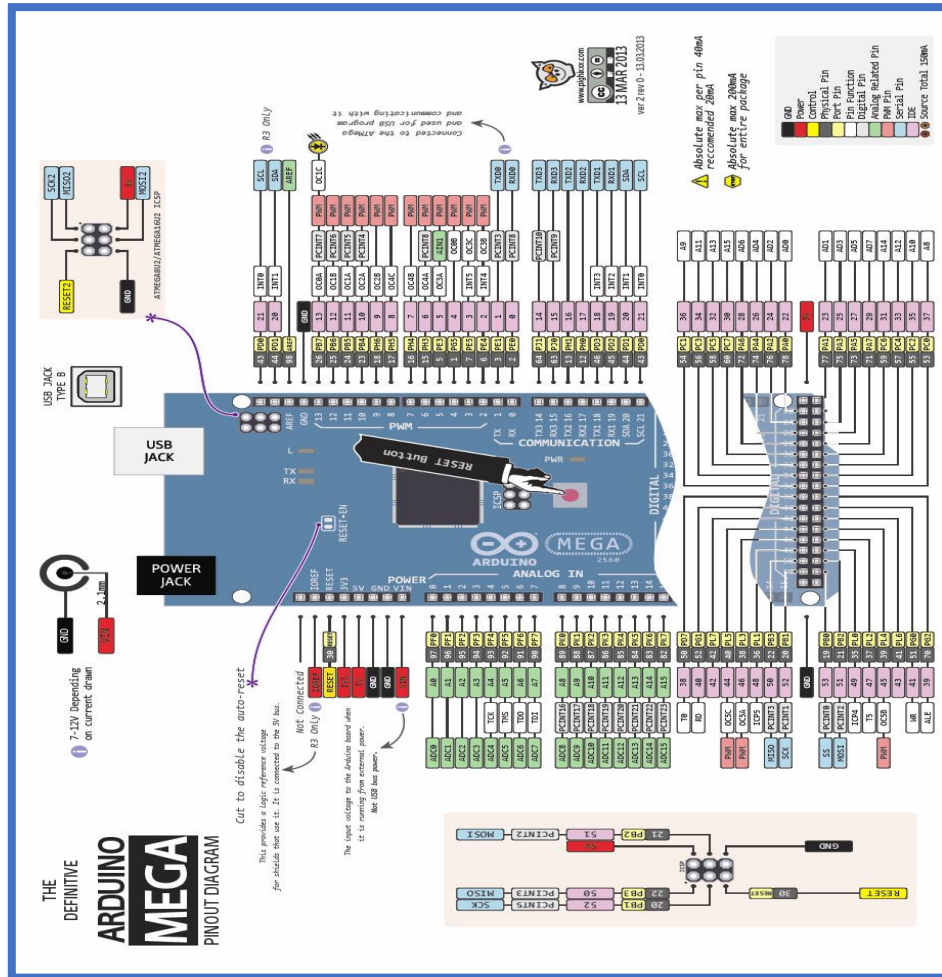
El prototipo puede ser ampliado mediante la implementación de otros elementos que permitan controlar diferentes variables a medida que vaya avanzando la tecnología o sea necesario controlar otros factores físicos.

Se puede además implementar una base de datos que puede llegar a permitir la implementación mediante los datos recopilado de otros métodos de control, así como métodos de inteligencia artificial o métodos de machine Learning

El proyecto puede ser mejorado a partir de la implementación de un sistema de control de incidencia de iluminación natural que proporcione variaciones más homogéneas para las plantas dentro del sistema. Otro aspecto que se puede mejorar es la disminución de ruido en la adquisición de datos utilizando el promedio de “n” muestras adquiridas como entrada del sistema difuso. Así como el uso de un gabinete que impida que la humedad del sistema permee hacia la electrónica del mismo.

ANEXOS

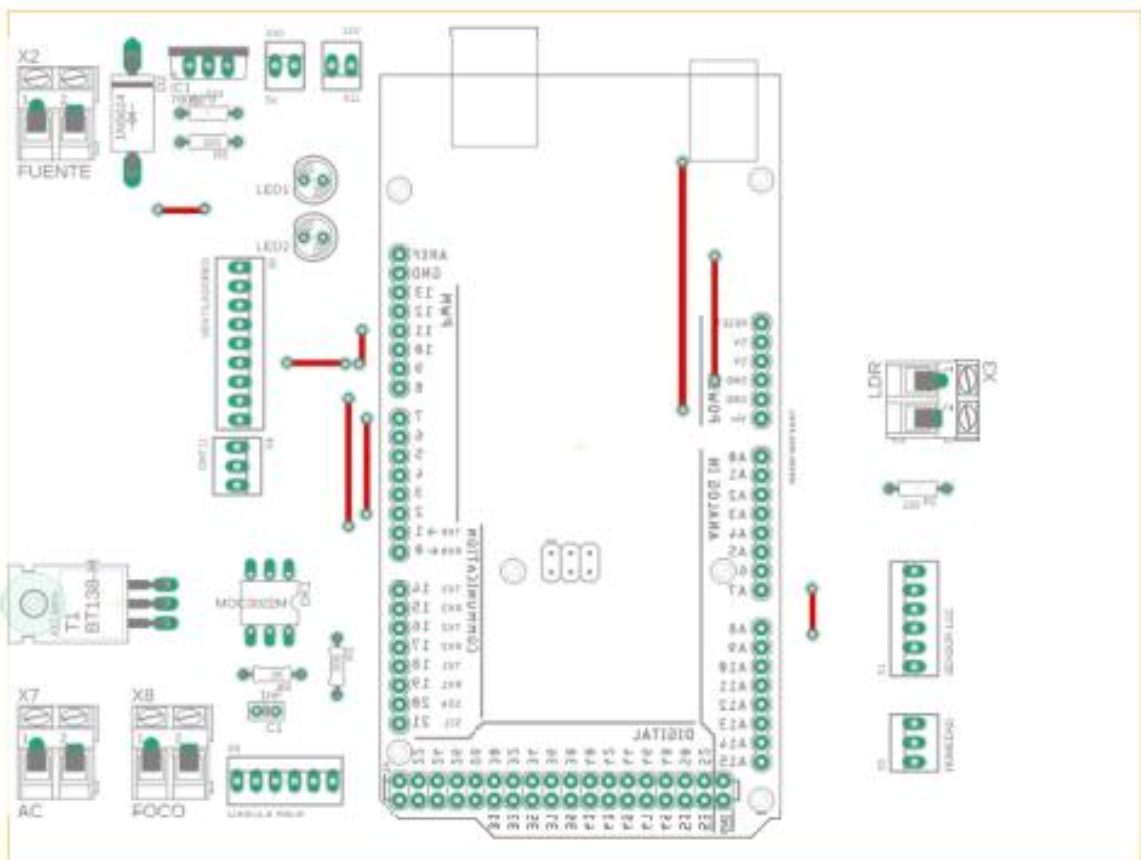
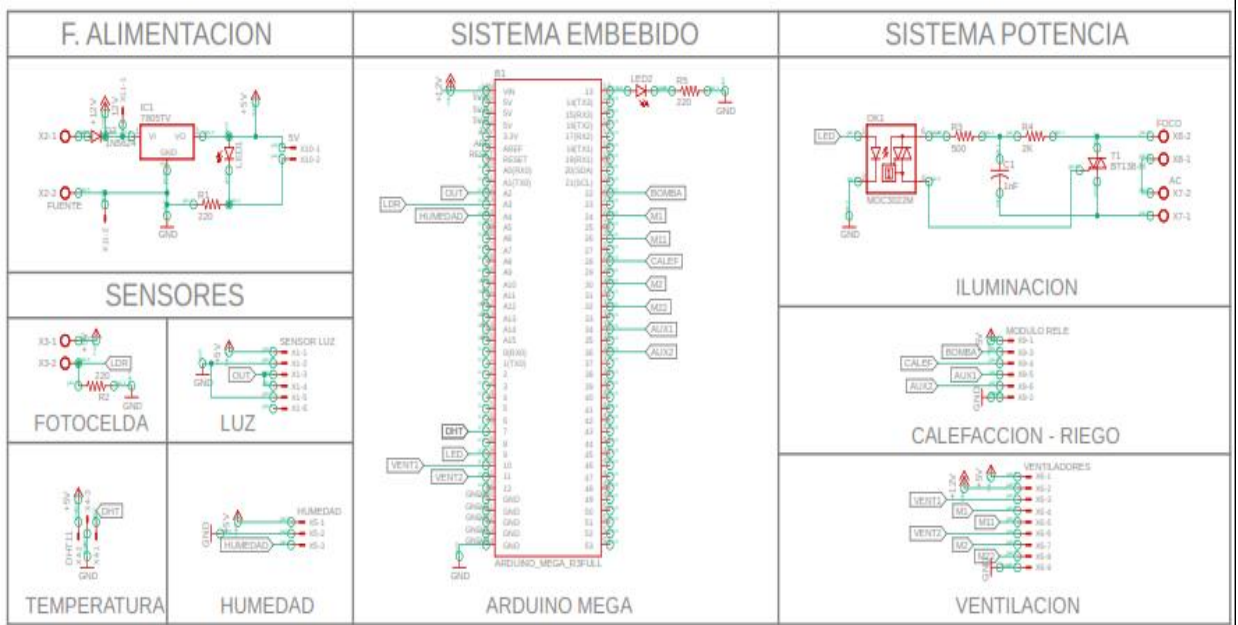
- TARJETA ARDUINO

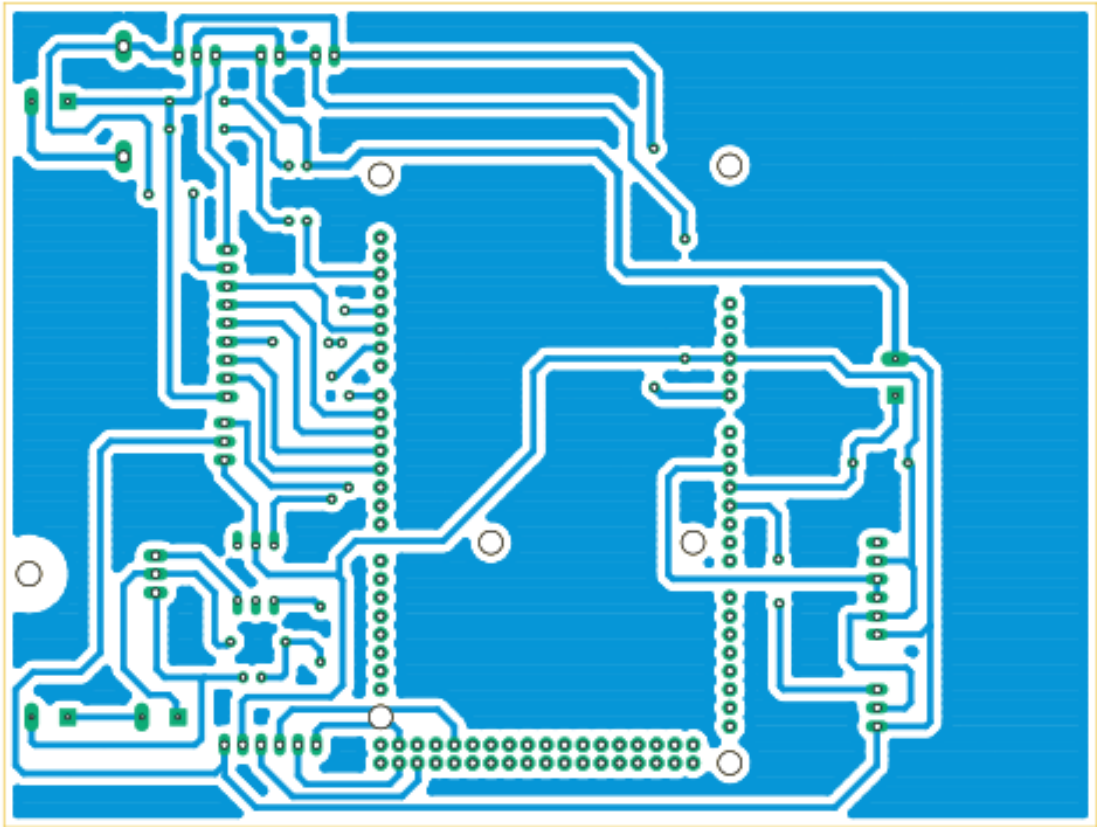


Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
USB Host Chip	MAX3421E
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	36 g

• PLACA DE CONTROL





- PRUEBAS



Bibliografía

- [1] Wang, Ji, Zhu, Chen y Zhang, «An Intelligent Controlling System For LED Plant Supplemental Lighthing Greenhuse,» *Symposium on Photonics and Optoelectronics, Shanghai*, vol. 1, pp. 1-3, 2012.
- [2] M. X. B. J. M. H. C. R. a. J. S. Martinez, «Monitorización y control de procesos. Una visión teórico-práctica aplicada a invernaderos,» *RIAI*, pp. 5-24, 2005.
- [3] B. D. H. M. J. Lin, «Ptotosynthetic plasticity of Phalaenopsis in response to different light environments,» *J. Journal of Plant Physiology*, vol. 161, pp. 1259-1268, 2004.
- [4] Y. Li, «A Further Study on the Representation Method of Plant Photosynthetic Capacity Based on Unsaturated Light-Induced Delayed Fluorescence Intensity.,» *Photonics and Optoelectronics (SOP0), 2011 Symposium on. Wuhan: IEEE*, vol. 16, p. 5, 2016.
- [5] A. Fernández Diaz, «Diseño de un controlador climático para un invernadero,» *Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial*, 2015.
- [6] D. K. T. E. J. Lee, «Static decouplers for control of multivariable processes,» *American Institute of Chemical Engineers Journal 51*, vol. 62, pp. 2712-2720, 2016.
- [7] P. &. M. M. Grosdidier, «A computer aided methodology for the design of decentralized controllers,» *Computers and Chemical Engineering*, pp. 423-433, 2015.
- [8] G. Danhke, «Investigación y comunicación,» *La comunicación humana: ciencia social*, p. 115, 1989.
- [9] S. Hernández, «Definición del alcance de la investigación a realizar: exploratoria, descriptiva, correlacional explicativa,» *Metodología de la Investigación. México. McGraw Hill*, pp. 57-68, 2003.

- [10] J. e. a. Aguilar, «Edificación Sustentable,» *Caos Conciencia*, pp. 31-37, 2015.
- [11] L. Miroslava Cano, «Diseño y simulación de un sistema de control Smart Home,» *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, vol. 3, pp. 13-19, 2017.
- [12] J. E. Gómez, S. Castaño, T. Mercado, J. García y A. Fernández, «SISTEMA DE INTERNET DE LAS COSAS (IoT) PARA EL MONITOREO DE CULTIVOS PROTEGIDOS,» *INTERNET OF THINGS (IoT)*, pp. 2-3, 2017.
- [13] Popovic, «Sistemas de Control,» *Sistemas de Control*, 2017.
- [14] T. A. y. M. L. K. Kobayashi, «Diodos emisores de luz (LED) para lechugas hidropónicas en miniatura,» *Optics and Photonics Journal*, vol. 5, pp. 74-77, 2016.
- [15] C. C. y. E. J. U. Surendran, «Cultivo hidropónico de mentha spicata y comparación de las actividades bioquímicas y antioxidantes con plantas cultivadas en el suelo,» *Acta Physiologiae Plantarum*, vol. 39, pp. 1-14, 2017.
- [16] R. G. y. V. Adamchuk, «Agricultura de precisión y seguridad alimentaria,» *Science*, vol. 336, pp. 828-831, 2018.
- [17] N. L. T. Y. M. T. T. M. T. K. e. a. MF Brandon, «La próxima evolución de la agricultura».
- [18] G. G. R. W. y. J. S. HH Kim, «Conductancia estomática de lechuga cultivada bajo o expuesta a diferentes calidades de luz,» *Annals of Botany*, vol. 106, pp. 691-697, 2016.
- [19] G. G. H. K. R. W. y. J. S. NC Yorio, «Mejora del crecimiento de la lechuga y el rábano espinaca bajo diodos emisores de luz roja (LED) con suplementos de luz azul,» *HortScience*, vol. 36, pp. 380-383, 2001.
- [20] K. K. y. K. R. K. Lakkireddy, «Papel de la hidroponía y la aeroponía en el cultivo sin suelo en la producción comercial de alimentos,» *Journal of Agricultural Science & Technology*, vol. 5, pp. 26-35, 2016.

- [21] T. Namgyel, C. Khunarak, S. Siyang y T. Pobkrut, «Efectos de la luz LED suplementaria sobre el crecimiento de la lechuga en un sistema hidropónico inteligente,» *Chiang Mai, Tailandia*, 2018.
- [22] G. G. R. W. y J. S. H.-H. Kim, «Suplemento de luz verde para mejorar el crecimiento de la lechuga bajo diodos emisores de luz roja y azul,» *HortScience*, vol. 50, 2013.
- [23] R. S. C. R. J. y A. F. Ramírez M.E., «Desarrollo de un prototipo de deshidratador solar instrumentado sustentable,» *Revista de Prototipos Tecnológicos*, pp. 2-4:22-29, 2016.
- [24] J. Sánchez, J. Guzmán y F. y B. M. Rodríguez, «Modelado de la transpiración de un cultivo de tomate bajo invernadero para el diseño de sistemas de control de riego,» *XXIX Jornadas de Automática*, 2010.
- [25] C. V. J.D, «Automatización de un invernadero”. Elaboración de prototipo didáctico,» *Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla*, 2015.
- [26] E. a. Saavedra, «Sistemas de iluminación, situación actual y perspectivas,» *Revista TECNIA*, vol. 26, 2016.
- [27] B. a. Al-Hadithi, «Desarrollo de un Sistema de Iluminación Artificial Inteligente para Cultivos Protegidos,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial.*, vol. 13, pp. 421-429, 2016.
- [28] A. e. a. Vieira, «Sistema domótico para control de temperatura e iluminación de un apartamento para lesionados medulares,» *Revista Tekhné*, pp. 23-45, 2018.
- [29] E. e. a. Alvarino, «Diseño de un dispositivo domótico para control de iluminación,» *Revista Investigación y Desarrollo en TIC*, vol. 6, pp. 26-33, 2015.
- [30] C. Contreras, «Fábrica e plantas con iluminación artificial para el Cultivo y Preservación sostenible de Hierbas medicinales,» *Universidad Tecnológica de Panamá*, 2020.

- [31] Kozai, «PFAL Business and R&D in the World: Current Status and Perspectives. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Production System,» *Academic Press Ed., San Diego, USA: Elsevier*, 2016.
- [32] Arduino, «Arduino,» Arduino, 2017. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>.
- [33] Ó. T. Artero, «Arduino: curso práctico de formación,» *Madrid, España: RC libros*, 2013.
- [34] R. E. Herrador, «Guía de usuario de Arduino,» *España: Universidad de Córdoba.*, 2009.
- [35] Arduino, «Arduino,» 2019.
- [36] Tecbolivia, «tecbolivia,» 2019. [En línea]. Available: <http://tecbolivia.com/index.php/venta-de-componentes-electronicos-11/sensores/m%C3%B3dulo-sensor-de-intensidad-de-luz-cjmcu101-opt101-detail>.
- [37] Polaridad.es, 2019. [En línea]. Available: <https://polaridad.es/ldr-fotorresistencia-luz-luminosidad-medir-medicion-arduino/>.
- [38] V. Ventura, «polaridad.es,» [En línea]. Available: <https://polaridad.es/ldr-fotorresistencia-luz-luminosidad-medir-medicion-arduino/>.
- [39] Aprendiendoarduino, 2018. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/dht/>.
- [40] Naylampmechatronics, 2018. [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/57-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11.html>.
- [41] L. LLamas, 2018. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/>.
- [42] hydroenv.com, 2017. [En línea]. Available: https://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=429.

- [43] I. C.C., «Infoagro,» 2017. [En línea]. Available: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm.
- [44] Amazon, 2020. [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/crecimiento-adecuado-interior-promueve-resistente/dp/B08K94ZTHT>.
- [45] Ledbox, «blog.ledbox.es,» [En línea]. Available: <https://blog.ledbox.es/ledbox-2/productos/claves-de-la-iluminacion-led-para-cultivos-de-interior>.
- [46] V. García, «diarioelectronicohoy.com,» [En línea]. Available: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-puente-h-h-bridge>.
- [47] puntoflotante.net/, 2018. [En línea]. Available: <https://www.puntoflotante.net/DRIVER-PWM-PUENTE-H-MOTORES-CD.htm>.
- [48] Robots-argentina, 2017. [En línea]. Available: <http://robots-argentina.com.ar/didactica/modulos-de-rele-y-arduino-domotica-1/>.
- [49] H. Pérez y M. Cortés, «Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero,» *Ciencia Unisalle*, 2015.