

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELECTRÓNICO E INGENIERA ELECTRÓNICA**

**TEMA:  
DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TELECONTROL PREDICTIVO  
PARA UN INVERNADERO USANDO TECNOLOGÍA CLOUDING PARA  
LA EMPRESA GREEN-HOUSE EN QUITO**

**AUTORES:  
ROJAS ROJAS LUIS JAVIER  
VEINTIMILLA MOREIRA JOSELYN LISSET**

**TUTOR:  
AUCATOMA GUAMÁN LENIN WLADIMIR**

**Quito, enero de 2018**

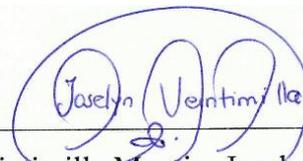
## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Rojas Rojas Luis Javier y Veintimilla Moreira Joselyn Lisset, con documentos de identificación N° 171678815-1 y N° 172584534-9, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TELECONTROL PREDICTIVO PARA UN INVERNADERO USANDO TECNOLOGÍA CLOUDING PARA LA EMPRESA GREEN-HOUSE EN QUITO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico e Ingeniera en Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Rojas Rojas Luis Javier

C.I: 1716788151



Veintimilla Moreira Joselyn Lisset

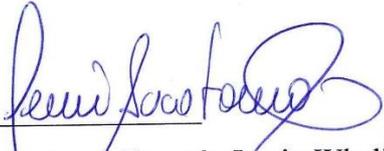
C.I:1725845349

Quito, enero de 2018

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollada el Proyecto de Titulación, “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TELECONTROL PREDICTIVO PARA UN INVERNADERO USANDO TECNOLOGÍA CLOUDING PARA LA EMPRESA GREEN HOUSE EN QUITO”, realizado por Rojas Rojas Luis Javier y Veintimilla Moreira Joselyn Lisset, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, enero de 2018



Aucatoma Guamán Lenin Wladimir  
C.I.:171798583-0

## **DEDICATORIA**

Dedicamos nuestro trabajo de titulación a todos los jóvenes con nuevas iniciativas y ganas de hacer de lo tradicional algo innovador. A aquellos que no se rinden ni se dan por vencidos a pesar de las dificultades que se puedan presentar. Les animamos a seguir adelante con sus proyectos, ideas y sueños que con esfuerzo y dedicación se pueden cumplir. Y a nuestras familias por todo su amor, comprensión, paciencia y sobre todo a Dios por cada día de vida prestado.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos en primer lugar a Dios por permitirnos llegar a esta meta, por todo su amor para con nosotros y por darnos la sabiduría y las fuerzas para llegar hasta aquí. A nuestras familias por todo su apoyo y comprensión. A nuestros queridos profesores que supieron impartirnos sus conocimientos. A nuestro tutor el Ing. Lenin Aucatoma por su apoyo y dedicación al realizar con nosotros este proyecto.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
Índice DE CONTENIDO .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABLAS .....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN .....	xiii
CAPÍTULO 1 .....	1
ANTECEDENTES.....	1
1.1 PROBLEMA A RESOLVER.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.1 Objetivos específicos .....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
Capítulo 2.....	3
Fundamentación teórica .....	3
2.1 CONTROL PREDICTIVO .....	3
2.2 ELEMENTOS DEL CONTROL PREDICTIVO .....	4
2.2.1 Modelo de Predicción .....	4
2.2.2 Función de coste .....	4
2.2.3 Restricciones.....	4
2.2 CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS .....	5
2.3 Sensores .....	7
2.3.1 Sensor de Temperatura .....	7
2.3.2 Sensor de Humedad .....	7
2.3.3 Sensor de Luminosidad.....	8

2.3.4	Sensor de Cantidad de CO2 .....	8
2.4	TECNOLOGÍA COMPUTING CLOUDING.....	8
2.4.1	IaaS .....	8
2.4.2	PaaS .....	9
2.4.3	SaaS .....	9
2.5	PLATAFORMAS DE DESARROLLO .....	9
2.5.1	Node.JS.....	9
2.4.6	Meteor.....	10
2.4.7	Base de datos .....	10
2.4.8	Mongo DB .....	11
2.4	HARDWARE.....	11
2.4.1	Raspberry Pi 3.....	11
2.4.2	ESP 8266.....	12
Capítulo 3	.....	13
Desarrollo del sistema	.....	13
3.1	DISEÑO DE GESTIÓN DE LA RED .....	13
3.1.1	Topología de la red de sensores.....	13
3.1.2	Diseño del Servidor Web.....	15
3.1.3	Construcción del Servidor Web.....	15
3.1.4	Desarrollo y arquitectura para la toma de datos de los sensores .....	17
3.1.5	Visualización del Servidor.....	18
3.2	DISEÑO DEL CONTROL PREDICTIVO .....	19
3.3	MODELAMIENTO DEL INVERNADERO.....	21
3.3.1	Modelo de Temperatura.....	22
3.3.2	Modelo de Humedad.....	22
3.3.3	Modelo de la Concentración de CO2.....	23
3.3.4	Modelo de la Radiación .....	23

3.4	ESTRUCTURA DEL CONTROL .....	24
3.4.1	Diseño del controlador .....	27
3.4.2	Simulación en Matlab .....	27
3.4.3	Implementación en Python .....	29
3.5	CONTROL MANUAL .....	30
CAPÍTULO 4 .....		31
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		31
4.1	ANÁLISIS DE TRÁFICO .....	31
4.1.1	Análisis de la Página Web greenhouseec.com.....	31
4.1.2	Análisis de la plataforma de monitoreo para Green House .....	33
4.1.3	Análisis y Aportación de los sensores al servidor .....	34
4.1.4	Tecnología Clouding.....	35
4.2	ANÁLISIS DEL CONTROLADOR PREDICTIVO .....	36
4.2.1	Resultados de la implantación del control Remoto del sistema.....	41
CONCLUSIONES .....		42
RECOMENDACIONES .....		44
LISTA DE REFERENCIAS .....		45
ANEXOS .....		46
	DATOS TÉCNICOS DE RASPBERRY PI 3.....	46
	DATOS TÉCNICOS ESP 8266.....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema del control predictivo.....	7
Figura 2.2. Módulo Wifi ESP 8266.....	12
Figura 3.1 Topología de la red de sensores.....	14
Figura 3.2 Código en Node.JS del servidor Web.....	16
Figura 3.3 Código Arduino de sensor del sensor DHT11.....	16
Figura 3.4 Código Arduino de sensor de Temperatura y sus componentes.....	17
Figura 3.5 Implementación de Sensores al Servidor.....	17
Figura 3.6 Visualización del Servidor.....	18
Figura 3.7 Visualización de la Página de Monitoreo.....	18
Figura 3.8 Visualización de la Administración de la Página de Monitoreo.....	19
Figura 3.9 Visualización del Monitoreo con control.....	19
Figura 3.10 Estructura del Invernadero Green House.....	20
Figura 3.11 Plano Eléctrico del Invernadero Green House.....	21
Figura 3.12 Diagrama de flujo de la planta.....	24
Figura 3.13 Programa realizado en Matlab.....	28
Figura 3.14 Programa realizado en Matlab.....	28
Figura 3.15 Visualización del programa Python.....	29
Figura 3.16 Tablero de accionamiento manual.....	30
Figura 4.1 Métricas de Carga de la Página Green House.....	32
Figura 4.2 Métricas de los recursos utilizados en la Página Green House.....	32
Figura 4.3 Análisis de Data Rate del servidor web.....	34
Figura 4.4 Sensores conectados al servidor web.....	35
Figura 4.5 Propuesta de Sistema de Monitoreo y control de la empresa Green House.....	36
Figura 4.6 Control Predictivo en Matlab.....	37
Figura 4.7 Control Predictivo Python.....	37
Figura 4.8 Temperatura interna del invernadero.....	38
Figura 4.9 Controladores Remotos del servidor web.....	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Descripción del procesador.....	25
Tabla 3.2. Descripción de Sensores.....	25
Tabla 3.3. Descripción de Módulo de Comunicación.....	26
Tabla 3.4. Descripción de Actuadores.....	26
Tabla 4.1 Valores medidos de Data Rate Maquina externa.....	33
Tabla 4.2 Valores medidos de Data Rate Maquina Externa 2.....	33
Tabla 4.3 Carga de Volumen de datos de Página.....	33
Tabla 4.4 Comparación de Salida Ym entre Matlab y Python.....	39
Tabla 4.5 Comparación del control u entre Matlab y Python.....	40

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un sistema de telecontrol predictivo para la empresa “Green House Invernaderos Inteligentes”, en el cual se logró montar un servidor implementado en NodeJS con una base de datos no relacional, que permitió monitorear y controlar en tiempo real el invernadero asignado para este proyecto. Además se implementó el control predictivo el cual analiza las variables del sistema en tiempo presente para luego tomar acciones de control que alteren las condiciones futuras, ajustándose a un valor de referencia asignado para cada caso propuesto. Todos los datos se obtuvieron a través de cuatro sensores ubicados en lugares estratégicos en el interior del invernadero esto se consiguió gracias a que los sensores al ser inalámbricos permitieron mejorar la movilidad, es decir poder cambiarlos de ubicación hasta lograr encontrar puntos adecuados para la obtención de datos correctos, permitiendo que este sistema tenga una fácil instalación y obteniendo un registro que se mostró en tiempo real en el servidor principal de la empresa. Al utilizar el control predictivo se evitó inestabilidades o cambios bruscos de las condiciones internas dentro del invernadero, por lo que el desarrollo de este sistema logró estabilizar los parámetros adecuados para los cultivos generando ventajas que no se tienen en un sistema tradicional, por ejemplo: mejoró las condiciones de temperatura a través de una ventilación adecuada, que evitó la propagación de enfermedades causadas por temperaturas y humedades elevadas.

## **ABSTRACT**

In the present work, a predictive tele-control system was developed for the company "Green House Intelligent Greenhouse", in which it was possible to assemble a server implemented in NodeJS with a non-relational database, which allowed to monitor and control the greenhouse in real time assigned for this project. In addition, it was possible to carry out the predictive control that analyzed the system variables in the present time and then take control actions that alter future conditions, which was adjusted to a reference value assigned for each proposed case. All the data was obtained through four sensors located in strategic places inside the greenhouse. This was achieved thanks to the fact that the sensors being wireless allowed to improve mobility, that is to be able to change their location to find suitable points to obtain correct data, allowing this system to have an easy installation and obtaining a record that was shown in real time on the main server of the company. When using the predictive control, instabilities or abrupt changes of the internal conditions within the greenhouse were avoided, so the development of this system was able to stabilize the adequate parameters for the crops, generating advantages that are not available in a traditional system, for example, improved the temperature conditions through adequate ventilation, which prevented the spread of diseases caused by high temperatures and humidity.

## INTRODUCCIÓN

La tendencia tecnológica industrial y corporativa, busca alcanzar innovaciones que permitan alta productividad y competitividad, en el mercado actual a mediano y largo plazo, permitiendo autosustentabilidad, incluyendo mecanismos que permitan la gestión tanto local como remota, por esto, en la actualidad los procesos incorporan nuevos avances tecnológicos a sus sistemas, para así volverse más eficientes y competitivos dentro de la industria y el mercado. Por ello es innovador fusionar el uso de la electrónica con la agricultura tradicional. En el presente trabajo se desarrolla, un sistema de telecontrol predictivo para un invernadero de la empresa GREEN-HOUSE el cual implementa un controlador avanzado que analiza los estados pasados y presentes para tomar acciones de control en el futuro, añadiendo al proceso la adquisición de datos, mediante una plataforma web desarrollada en Node Js y mostrando los datos recibidos en tiempo real en la página web de la empresa, desde la cual también es posible activar remotamente los actuadores del sistema. Los argumentos para este trabajo se encuentran detallados de los siguientes cuatro capítulos. Comenzando con el capítulo uno en donde se describe el problema a ser estudiado y los objetivos a ser desarrollados con la respectiva justificación para la realización de este proyecto. En el capítulo dos se relata el marco teórico utilizado para la implementación del telecontrol y el control predictivo, así como conceptos básicos de controladores predictivos, sensores, desarrollo web y demás conceptos relacionados directa e indirectamente con el tema. El capítulo tres trata del diseño y la implementación del servidor web para el telecontrol y de la plataforma elabora en Python para el control predictivo siendo este contrastado con un programa que fue desarrollo en Matlab para su posterior análisis de resultados en donde se compararan ambos resultados. Dentro del capítulo cuatro se analizan los valores adquiridos del control predictivo y de los resultados obtenidos en el análisis de tráfico de datos, que permitirán entender cuál es el aporte del servidor web implementado dentro del servidor principal de la empresa y si este perjudica de alguna manera el normal desempeño de la página. Todo este sistema es elaborado en una Raspberry Pi 3 con el sistema operativo propio de esta, Debian.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

En este primer capítulo analizará el problema a resolver, así como los objetivos, alcances y metodologías a desarrollarse en este proyecto de titulación.

### 1.1 PROBLEMA A RESOLVER

La empresa “Green House” con una gran visión tecnológica, en la actualidad no dispone de la tecnología adecuada para realizar el control y monitoreo de los cultivos en sus invernaderos, una causa posible es el alto costo que tendría el montar una red con equipos importados. Otro hecho importante es que la empresa desea implementar un sistema que permita controlar dos tipos de cultivo dentro de una misma área de trabajo y que éste sea capaz de ser monitoreado y controlado desde fuera del invernadero, enlazando los datos a la página Web de la empresa. Dentro de las variables tenemos la temperatura, humedad, nivel de radiación y cantidad de CO<sub>2</sub> en el ambiente, que son factores determinantes en el crecimiento de las plantaciones. Lo anterior nos lleva a las siguientes interrogantes. ¿En qué condiciones debe trabajar el control predictivo de tal forma que su algoritmo permita ayudar a manejar dos cultivos con variables que afectan a estos, logrando mejorar el control y monitoreo continuo de los cultivos? Y la otra pregunta que se establece es ¿Qué efecto tendrá enlazar estos datos a través de la tecnología clouding, y si la carga de datos soportará la página sin que se perjudique el desempeño normal que se genera en sus actividades cotidianas?

### 1.2 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema predictivo en un invernadero de la empresa Green House para controlar y monitorear de forma local y remota, usando tecnología cloud para transferencia de datos con la página web de la empresa.

#### 1.2.1 Objetivos específicos

- Desarrollar el sistema de control predictivo para el invernadero con un algoritmo que permita el monitoreo y control del sistema.
- Diseñar la plataforma de enlace de datos para la conexión entre el control del sistema y la página web a través de tecnología clouding.

- Analizar el tráfico que soporta la página web con la implementación de la nueva plataforma para contrastar el flujo de datos que recibe la página web.
- Verificar el funcionamiento del sistema de control predictivo y la plataforma de conectividad para la gestión remota, realizando pruebas para el análisis de resultados.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La empresa GREEN HOUSE dedicada a la producción de cultivos orgánicos, dentro de sistemas controlados como lo son los invernaderos, necesita la implementación de procesos basados en la Tecnología de la Información (TIC), sumando la característica de que estos sistemas a implementar deben ser de bajo costo. El sistema de monitoreo y control a desarrollar en el invernadero, permitirá la gestión y el manejo de dos cultivos, los cuales son tomate y frutilla considerados en este trabajo por su ciclo corto. Se analizará las características de un correcto manejo de variables del cultivo mediante sensores y actuadores, añadiendo el monitoreo de estos procesos, a la página web de la empresa. Este desarrollo incluye una plataforma con lenguaje de programación libre, usando una Raspberry PI 3 y sensores Wireless. Además considerando que el control predictivo en un invernadero ofrece mejores prestaciones y eficiencia en el manejo de cultivos, que en los métodos utilizados tradicionalmente, ya que gestiona de forma eficaz los parámetros recibidos por el sistema, para tomar diferentes acciones de control. Estudiando la factibilidad del proyecto desde la perspectiva del coste de adquisición de equipos, se ha determinado que el sistema es viable gracias a la facilidad de encontrar los materiales y herramientas dentro del mercado nacional a precios convenientes. El beneficio a mediano y largo plazo del proyecto se enfoca en transformar la perspectiva de desarrollo que tiene la agricultura tradicional en el Ecuador mediante la utilización de Tecnologías de la Información (TICs).

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo encierra los fundamentos teóricos de modelos de control predictivo, los elementos y conceptos básicos del mismo, conjunto de sensores a ser usados en este proyecto, generalidades de la red para comunicación de los dispositivos y tecnología clouding.

#### 2.1 CONTROL PREDICTIVO

El Control Predictivo también llamado control avanzado, es una de las herramientas de control más utilizadas para predecir el comportamiento futuro de una planta en un determinado periodo. El control predictivo aplicado en cualquier tipo de sistema, tiene como objetivo acrecentar la productividad, ya que le permite al mismo ser estable, ser seguro y mejorar notablemente las remesas económicas. En este tipo de control como en cualquier otro es necesario un tipo de instrumentación adecuada, para que de esta manera sea posible identificar el o los lazos de control del sistema, aunque es posible también mejorar la instrumentación en caso de ser necesario. (Ghoumari, 2004)

Ya que el control predictivo funciona agregando restricciones para optimizar recursos, estas deben ser muy bien consideradas, ya que de ello dependerá el correcto funcionamiento del sistema. Existe una gran cantidad de algoritmos de control predictivo variables y resistentes, que cambian de acuerdo a la aplicación en el sistema. Según Mohammed Yassine el control predictivo: “Se pueden aplicar a una gran variedad de sistemas de fase mínima, no mínima, inestables, con retardo, inestables y multivariables. Los controladores predictivos necesitan un modelo de proceso a controlar, para predecir el comportamiento de este último” (Yassine, 2010)

Algunos de los controladores predictivos son explicados a continuación:

IDCOM o MPHC: Utiliza como modelo de predicción la respuesta impulsional (FIR), función de coste cuadrática, y restricciones en las entradas y salidas. El algoritmo de optimización es heurístico. (Benavides, 2010)

DMC: Es un modelo de predicción que responde a una entrada escalón, orientada a plantas con un comportamiento estable, ya que no considera restricciones.

QDMC: Es considerado una reforma del controlador DMC ya que adiciona restricciones a su sistema, las cuales son consideradas duras o suaves dependiendo el grado de manipulación que estas puedan tener de manera que se puedan evadir.

GPC: Su modelo de predicción se basa en la formulación Carima, que permite la incorporación de restricciones con respecto a la perturbación producida por el ruido blanco, las cuales están relacionadas con la estabilidad. (Marruedo D. L., 2002)

## **2.2 ELEMENTOS DEL CONTROL PREDICTIVO**

### **2.2.1 Modelo de Predicción**

El modelo de predicción, es aquel que representa matemáticamente el modelo dinámico de un sistema a ser analizado o controlado. El modelo del sistema puede ser lineal o no lineal, en tiempo discreto o continuo, asociar múltiples variables o tener solamente una, es decir un sistema MIMO o SISO, etc. El modelo debe representar de manera más fiel al proceso real ya que de esto dependerá la realización de las correctas predicciones.

### **2.2.2 Función de coste**

La función de coste es una función positiva, que indica el criterio a optimizar a lo largo de horizonte deslizante, y le dará prioridad a las acciones de control necesarias en cada caso, de manera que la predicción de la salida a lo largo del horizonte siga la señal de referencia establecida. (Marruedo D. L., 2002)

### **2.2.3 Restricciones**

Las restricciones, son por lo general los puntos óptimos de funcionamiento de nuestro sistema, es decir son limitaciones físicas del mismo. Las restricciones, pueden o no ser parte de nuestro proceso de control.

Existe una gran variedad de controles predictivos, sin embargo el más usado por su versatilidad es el basado en modelos MPC como se verá a continuación.

## **2.2 CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS**

El control predictivo basado en Modelos (CPMB o MPC), fue desarrollado en sus inicios exclusivamente para plantas petroleras y de energía, sin embargo, con el pasar de tiempo este fue teniendo apertura en la mayoría de industrias como la química, alimentarias, automotriz, etc. Desde el principio, le ha dado un gran giro a la ingeniería en control, ya que provee soluciones a procesos dinámicos y en ocasiones a sistemas muy complejos. Es conveniente la implementación de un controlador predictivo, por los siguientes motivos:

- Agregación de modelos en el proceso de control: Permite jugar con las características del sistema, y controlar de mejor manera el proceso.
- Visión de control predictivo al futuro: Le permite anticipar las perturbaciones que tendrá el sistema, y tomar las acciones de control correspondientes.
- Entradas del proceso con restricciones en la entrada y la salida: Cálculo de la señal de control óptima.
- Reducción de costos, al controlar de mejor manera los actuadores involucrados en el sistema

**El control predictivo según Marruelo: el control predictivo al obtener un modelo dinámico permite predecir el comportamiento que tendrá la planta. Los valores predichos permiten la optimización de recursos y reducción de costos.** (Marruedo D. L., 2002)

El control predictivo, posee ventajas muy favorables en un proceso, por el simple hecho de arreglar restricciones en condiciones muy variables, sin embargo también su principal desventaja, es que presenta un algoritmo muy complejo por lo cual tiene un “coste computacional elevado” (Julio C. Zambrano, Ana I. Gonzalez, 2013).

Por otro lado, al ser sencillo implementar el algoritmo, las variaciones utilizan un modelo de predicción lineal, aunque también es posible implementarlo en modelos no lineales como por ejemplo el DMC (Control con Matriz dinámica), que es un modelo

de predicción con matrices de coeficientes de respuesta al escalón del sistema, también se tiene el GPC, uno de los más conocido dentro del control predictivo, usa un modelo “CARIMA” (Controller Autoregressive and Integrated Moving-Average), que permite representar el comportamiento de la planta al tener perturbaciones no estacionarias. (Julio C. Zambrano, Ana I. Gonzalez, 2013)

El objetivo de MPC, consiste en el hallazgo de una trayectoria futura de la variable manipulada  $u$ . Esto se realiza fijando un horizonte de predicción  $N$ , para el cual se van a predecir en cada instante  $k_i$  las salidas futuras, utilizando un modelo de predicción que describe el comportamiento de las variables del proceso a controlar, el cual reside en el controlador. Las predicciones dependen de los valores conocidos hasta el instante  $k_i$ , y de las señales de control futuras como se puede ver en las ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3). (Julio C. Zambrano, Ana I. Gonzalez, 2013)

$$y(k_i + 1|k_i) = C_e A_e x(k_i) + C_e B_e \Delta u(k_i) \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$y(k_i + 2|k_i) = C_e A_e^2 x(k_i) + C_e A_e B_e \Delta u(k_i) + \dots + B_e \Delta u(k_i + 1) \quad \text{Ec. (2.2)}$$

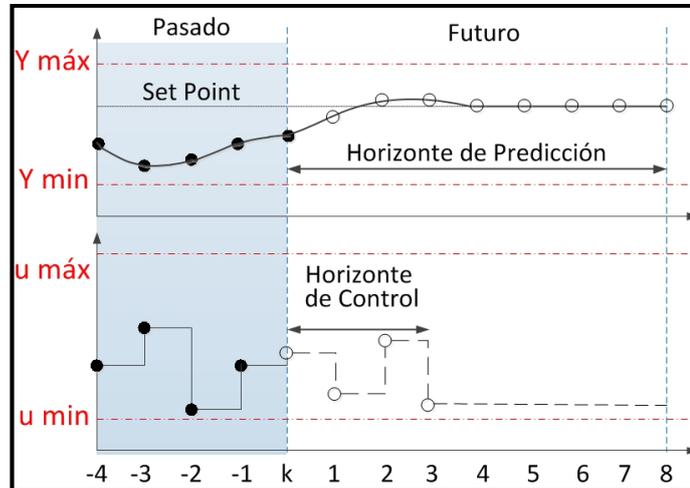
$$y(k_i + N|k_i) = C_e A_e^N x(k_i) + C_e A_e^{N-1} B_e \Delta u(k_i) + \dots + C_e A_e^{N-2} B_e \Delta u(k_i + 1) + \dots + C_e A_e^{N-M} B_e \Delta u(k_i + M - 1) \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Por otra parte, para calcular las señales de control futuras se utiliza una función de coste, que en el caso estándar es cuadrática y penaliza los errores entre la salida predicha, y la trayectoria de referencia. Generalmente, se suele incluir el esfuerzo de control en la función de coste cuadrática, este esfuerzo es quien dará la importancia a la función de coste o no, dependiendo del valor que se le sea otorgado.

El algoritmo de control predictivo puede ser resuelto analíticamente, sin el uso de restricciones, pero en caso contrario se debe utilizar un algoritmo iterativo de optimización. En cualquier caso, la solución al problema devuelve un vector que contiene las acciones de control futuras, cuya dimensión depende del horizonte de control y del horizonte de predicción, sin embargo, solamente el primer elemento de este vector debe ser enviado a la planta. Este proceso se vuelve a repetir para cada

instante  $k$ . La estrategia MPC y la idea de algunos de los términos involucrados se ilustran en la Figura 1.

Figura 2.1 Esquema del control predictivo



(Fuente: Autor Julio Zambrano de la Universidad Pontificia de Valencia) La figura muestra el esquema del control predictivo mostrando el horizonte de predicción y de control.

## 2.3 SENSORES

Los sensores utilizados en el desarrollo de este trabajo, son el sensor de Temperatura, sensor de humedad del suelo, sensor de radiación y un sensor medidor de la cantidad de  $\text{CO}_2$  en el ambiente, los cuales permiten la medición de las condiciones más importantes dentro del manejo de cultivos y son descritos a continuación.

### 2.3.1 Sensor de Temperatura

Los sensores de temperatura, como su nombre lo indica, permiten medir las variaciones de temperatura producidas en el ambiente dentro de un sistema. Existe una gran cantidad de formas de medir la temperatura, tanto directa (termómetros), como indirectamente como por ejemplo: a través de la presión, la humedad, etc. Los sensores más usados son: las termocuplas, termorresistencias, termistores, diodos y sensores de silicio. El sensor usado en este caso, está compuesto por un termistor que medirá la temperatura del aire que circule alrededor de él.

### 2.3.2 Sensor de Humedad

La humedad, depende de la cantidad de moléculas de agua en una determinada sustancia, que puede estar en estado sólido o gaseoso. (Kouro, 2001). En base a lo

anterior, el sensor de humedad, permite determinar la cantidad de agua existente de acuerdo al volumen de tierra que se tenga. De acuerdo a la humedad presente en el suelo, el sensor variara su resistencia respecto de un voltaje. Por lo tanto mientras más húmedo se encuentre el suelo, el valor de la resistencia será menor, entre tanto que si existe un valor mayor de resistencia, la humedad del suelo ha disminuido.

### **2.3.3 Sensor de Luminosidad**

La radiación solar, es un conjunto que engloba una gran variedad de rayos y ondas, como la luz, el calor, los rayos ultravioleta (UV), los infrarrojos (IR) o rayos X. La luminosidad viene dado a partir de la radiación de onda corta emitida por el sol. Debido a esto se utilizara un sensor de radiación, que permita medir las variaciones de onda corta que ingresan al invernadero, debido a que por el factor de conversión del plástico toda la onda emitida por el sol no será la misma que ingrese al invernadero. El sensor está compuesto por un fotodiodo, y emitirá una onda cuadrada que es directamente proporcional a la cantidad de radiación medida.

### **2.3.4 Sensor de Cantidad de CO<sub>2</sub>**

El CO<sub>2</sub> dentro de un invernadero, influye en la fotosíntesis de la planta, de manera que a mayor porcentaje, este proceso se realiza de una manera más eficiente. Este sensor mide la concentración de CO<sub>2</sub> presente en el ambiente, utilizando una celda electrolítica, formada por varios compuestos químicos que al interactuar con el aire, realizan una reacción química de electrodos, el cual provocara una variación del voltaje.

## **2.4 TECNOLOGÍA COMPUTING CLOUDING**

La tecnología clouding permite la integración de un sin número de servicios, sin la necesidad de integrar o estar sujeto a un hardware específico, pudiendo este ser montado en cualquier software, logrando simplificar los costos y mejorando la accesibilidad, para lo cual solo se requiere tener acceso a la red.

Este tipo de tecnología integra en tres tipos de servicios los cuales son: Infrastructure as a Service (IaaS), Plataform as a Service (PaaS), y Software as a Service (SaaS).

### **2.4.1 IaaS**

IaaS (Infrastructure as a Service), es considera la infraestructura de Servicio, se encarga de alguna forma del hospedaje de un centro de datos, dentro de este servicio

se puede rentar un espacio de almacenamiento, y un tiempo de cómputo para manejar los datos.

#### **2.4.2 PaaS**

PaaS (Platform as a Service), Plataforma de Servicio es una plataforma que soporta el desarrollo de aplicaciones, monitoreo, despliegues, hosting en la nube, este tipo de servicios no requieren de ningún software ni de ningún tipo de instalación, está pensada para trabajar en forma conjunta, entre los diferentes colaboradores que se conecten a la nube. Ejemplos de este tipo de plataformas tenemos Google App, Engine, Microsoft Azure, Amazon Map Reduce.

#### **2.4.3 SaaS**

SaaS (Software as a Service), Software como servicio, está pensado para usuarios finales que no quieren programar y son adquiridos bajo demanda, pero no requiere de actualizaciones después de ser adquiridas, las diferentes características pueden ser solicitadas dependiendo de los requerimientos de los usuarios finales.

### **2.5 PLATAFORMAS DE DESARROLLO**

Para la integración de los datos con la página Web se requiere del desarrollo de una aplicación que permita la integración con la página Web de la empresa para lo cual se buscara de una herramienta que permita la programación de esta aplicación, buscando se han encontrado diferentes herramientas informáticas que cumplen con este propósito pero se pretende realizar con la plataforma de desarrollo de Node.JS.

#### **2.5.1 Node.JS**

Node.js también llamado Nodo, es un servidor entorno de JavaScript, se basa en el tiempo de ejecución Implementación de Google, el aptamente llamado motor "V8". V8 y Node se implementan principalmente en C y C ++, centrándose en el rendimiento y el menor consumo de memoria. Pero, mientras que V8 apoya principalmente a JavaScript en el navegador, el propósito de Node es mantener por largos plazos el procesamiento del servidor. (Node.js, 2017)

A diferencia de la mayoría de los otros ambientes modernos, Un proceso de NodeJS no se basa en multi-hilo para apoyar la ejecución concurrente de datos lógicos; Se

basa en un evento de modelo asíncrono de entradas y salidas. Pensemos en el proceso del servidor NodeJS como un Daemon (Proceso que es ejecutable en un segundo plano) de un solo hilo que incrusta el motor de JavaScript para apoyar la personalización. Esto es diferente de la mayoría de los eventos del sistema para lenguajes de programación, que forman bibliotecas.

#### **2.4.6 Meteor**

Meteor es otra plataforma de desarrollo de aplicaciones Web muy potente pero con la peculiaridad de que es integrada con Node JS una descripción más claro de Meteor la encontramos en el portal web es.discover.com:

“Meteor es una plataforma para crear aplicaciones web en tiempo real construida sobre Node.js. Meteor se localiza entre la base de datos de la aplicación y su interfaz de usuario y se encarga que las dos partes estén sincronizadas. Como Meteor usa Node.js, se utiliza JavaScript en el cliente y en el servidor. Y más aún, Meteor es capaz de compartir código entre ambos entornos. El resultado es una plataforma muy potente y muy sencilla ya que Meteor abstrae muchas de las molestias y dificultades que nos encontramos habitualmente en el desarrollo de aplicaciones web”. (Greif, 2014)

#### **2.4.7 Base de datos**

Para almacenar la cantidad de información que generara el invernadero con los datos que se recopilaran se debe contar con una base de datos para lo cual se necesita estudiar cómo está estructurada la base de datos que se dispone en la página Web, investigando se determinó que la página tiene una base de datos en el entorno MySQL para lo cual es fundamental conocer de qué se trata este tipo de base de datos adicionales se puede aplicar al proyecto. También es importante definir las entidades de la base de datos para saber que variables se deben manipular.

MySQL es un manejador de base de datos que se basa en el Modelo Relacional entendiendo que el modelo relacional maneja las conexiones de los elementos involucrados entre sí. MySQL es considerada una base de datos que permite integrar diferentes aplicaciones y servicios que se encuentran en diferentes actividades desde los más simples usos en internet hasta robustas como el uso de cloud, una base de datos siempre debe estar disponible para poder realizar consultas o transacciones por ende debe ser bien diseñada con el fin de cumplir estos propósitos. Lo que hace que MySQL

sea llamativo es que permite la integración de este servicio con diferentes plataformas de programación aparte de que se considera como un servicio estable, se considera una base de datos relacional. Otra gran ventaja es que se dispone de gran información en la red para poder ser usado con bajos costos. (Suehring, 2002)

### **2.4.8 Mongo DB**

Mongo es considera una base de datos no relacional lo que ha llevado a mejorar las velocidades en su uso como lo describe el portal web [genbetadev.com](http://genbetadev.com):

“Mongo DB es un sistema de base de datos multiplataforma orientado a documentos, de esquema libre, esto significa que cada entrada o registro puede tener un esquema de datos diferente, con atributos o “columnas” que no tienen por qué repetirse de un registro a otro. Está escrito en C++, es bastante rápido a la hora de ejecutar sus tareas. Además, está licenciado como GNU AGPL 3.0, de modo que se trata de un software de licencia libre. Funcionando en sistemas operativos Windows, Linux, OS X y Solaris”. (Paramio, 2011)

## **2.4 HARDWARE**

Para logra integrar la plataforma de desarrollo con el invernadero es necesario utilizar un hardware adecuado para lo cual se utilizara la funcionalidad de la Raspberry Pi 3 y modelos de Arduino los cuales son descritos a continuación.

### **2.4.1 Raspberry Pi 3**

Desde el nacimiento de la Raspberry pi el modelo más actual que se tiene es la Raspberry Pi 3 es considerada una computadora por todas las facilidades y prestaciones que presenta, los grandes alcances que ha tenido la Raspberry a nivel mundial es impresionante, se puede encontrar documentación con facilidad y las aplicaciones son variables, el éxito de este dispositivo se debe en gran parte a la versatilidad de trabajo y bajo costo además de cargar diferentes sistemas operativos desde sistemas como Linux a sistemas actuales como Windows 10.

Las características de este dispositivo se pueden observar los puertos GIPO; estos son puertos de entrada y salida de propósito general, una RAM de 1 GB, incorpora un

módulo interno wifi con lo que permite una conexión a diferentes dispositivos que cuenten con este tipo de tecnología.

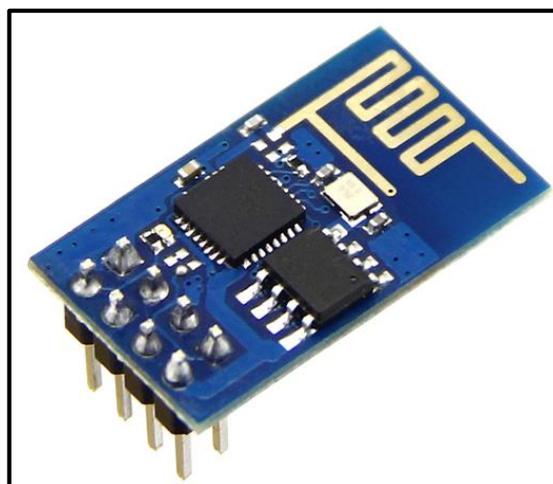
Las características exactas de este dispositivo encuentran en las hojas de anexos. Los sistemas operativos que permite este dispositivo son diversos pero no todos tienen el mismo rendimiento, es decir depende de los entornos de hardware que rodean al dispositivo pero dentro de los más utilizados se encuentran:

Raspbian que está basado en Debian, Adafruit Raspberry Pi Educational Linux que incluye herramientas y drivers para desarrollos electrónicos, Arch Linux especialmente en tarjetas ARM, Xbian que es distribuido por Raspbian, QtonPi que es una distribución basada en un framework de Qt5, Windows 10 que es el que está dando auge al internet de las cosas IoE.

#### **2.4.2 ESP 8266**

El ESP 8266 es un módulo Wifi que utiliza el ID de Arduino para comunicación Wireless producido por Espressif System en Shanghai. Tiene múltiples características que le permiten combinarse con sensores para que estos envíen o reciban datos a través de sus GPIOs configurados como entrada o salida respectivamente. Estos módulos son la nueva tendencia de IOT (Internet de las Cosas) ya que por estructura y funcionalidad, son ideales para la implementación de comunicaciones inalámbricas de bajo costo

Figura 2.2. Módulo Wifi ESP 8266



Gráfica de ESP 8266 para la comunicación Wifi de los sensores

## **CAPÍTULO 3**

### **DESARROLLO DEL SISTEMA**

Dentro de este capítulo se describe el diseño y la implementación del sistema para lograr el objetivo de aplicar los algoritmos de Control Predictivo y el diseño del servidor web para controlar el invernadero mediante el enlace hacia la página web de la empresa Green House.

Para la implementación del sistema es importante desglosar las partes principales que tiene el proyecto a implementar, los cuales son; el diseño de gestión de la red y el diseño del control predictivo, esto permite entender la arquitectura y el funcionamiento de la implementación.

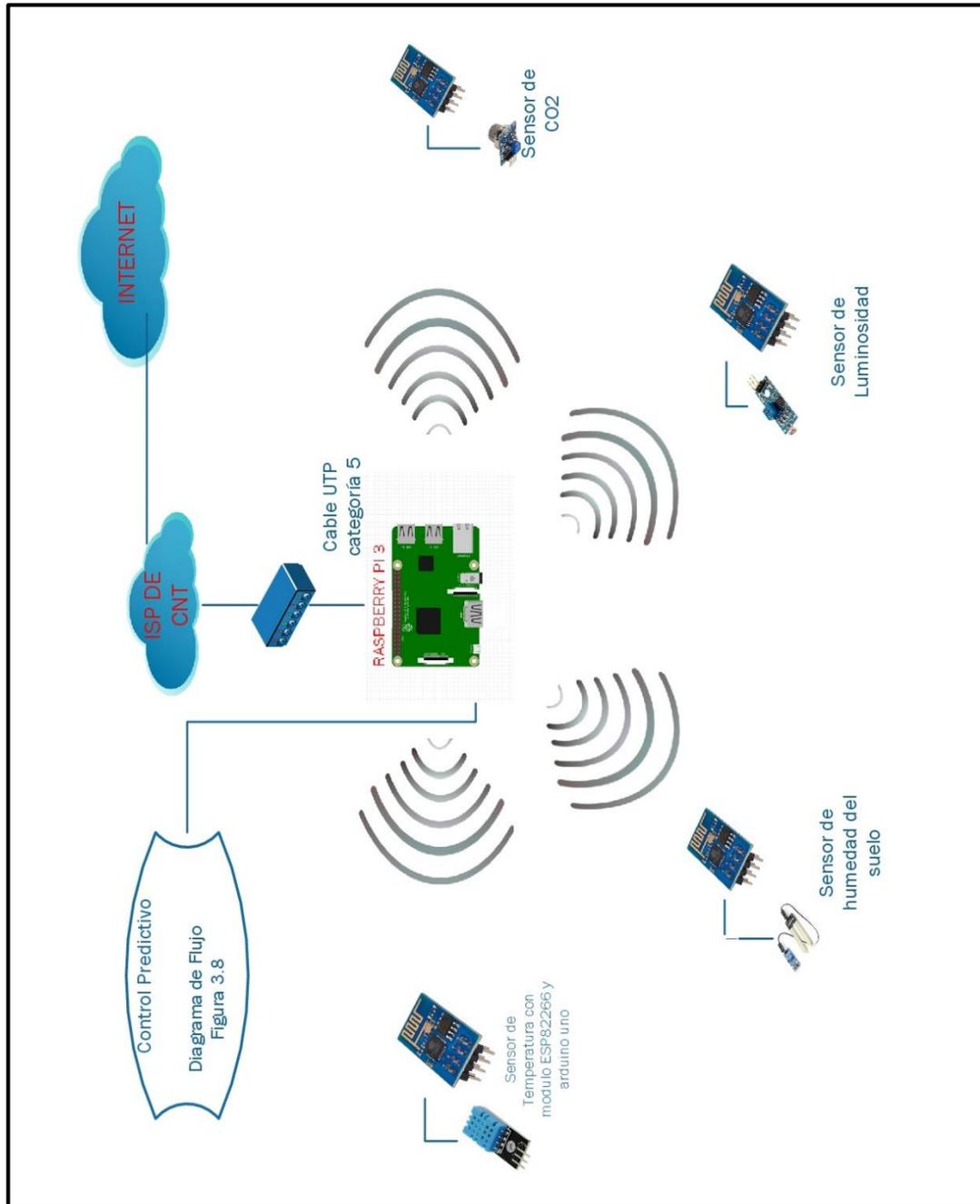
#### **3.1 DISEÑO DE GESTIÓN DE LA RED**

Para el diseño de gestión de la red es importante integrar los diferentes sensores y actuadores con el servidor a implementar, para ello es importante la colocación y el funcionamiento de los diferentes sensores para lo cual se diseñó el hardware adecuado para poder tener la conexión con el servidor como se observa en la figura.

##### **3.1.1 Topología de la red de sensores**

La elaboración de la red de sensores está basado en una red wireless (Wi-Fi) con topología MESH que permite el acceso de datos a la red ad hoc. Se consigue con la integración de los módulos ESP8266 y los sensores como se observa en la figura 3.1 lo importante de esta topología es que cada sensor se integra con el servidor a través de una dirección IP, esta IP es dada por el router del ISP que para este caso es CNT, donde también consta una salida con una IP publica para la salida de los datos hacia la red.

Figura 3.1 Topología de la red de sensores.



Topología de la red de Sensores para el monitoreo del invernadero utilizando sensores de temperatura, humedad, nivel de luminosidad y CO2 conectadas a la Raspberry Pi 3. Autores: Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

En la implementación de los sensores se utilizó el módulo ESP82266 que es un módulo wifi, el cual nos permite la comunicación de los datos analógicos, que son tomados por los diferentes sensores y comunicarnos a la Raspberry Pi donde está implementado el servidor para el monitoreo y control del invernadero. Además lo interesante de este

dispositivo es que puede soportar los estándares 802.11b/g/n y puede manejar diferentes canales lo que nos permite tener una red MESH.

### 3.1.2 Diseño del Servidor Web

Dentro de la Raspberry Pi 3 se levantó el sistema operativo Debian que es lenguaje libre, además es robusto para las aplicaciones requeridas para este proyecto.

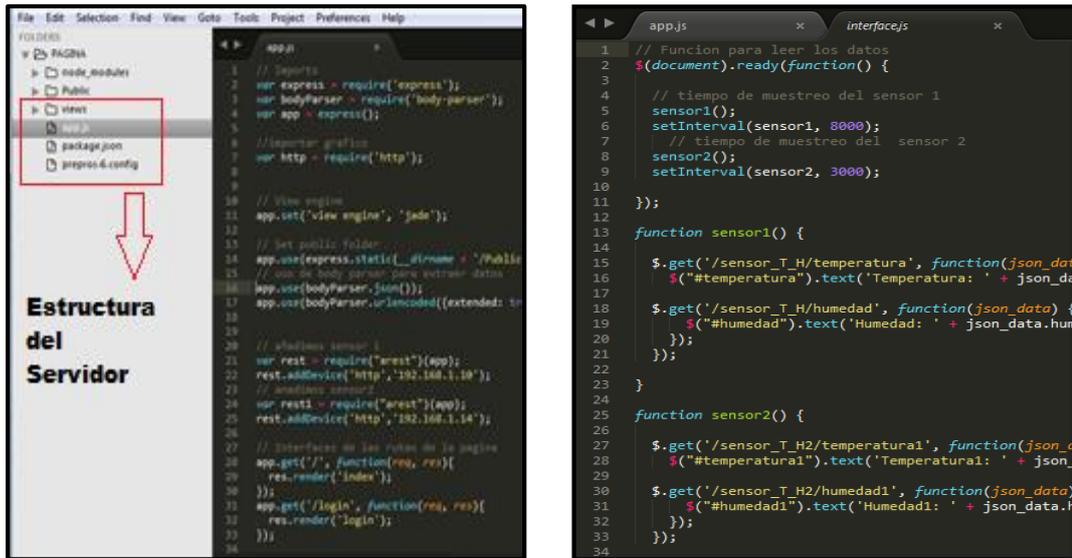
Dentro del sistema operativo se levantó el servidor para la interacción entre la página web de la empresa Green House y el Invernadero, el servidor se montó con Node.JS que es un servidor de lenguaje libre y que se tiene gran información para el manejo, también se instaló diferentes módulos para la integración de vistas y datos que permite interactuar con la página, además éste se integra con una base de datos que soporta archivos HTML, la base de datos instalada es MongoDB por lo que es una Base de Datos no relacional y por ende permite mayor velocidad de datos en tiempo real, esto permite tener un servidor robusto el cual pueda soportar la información que se obtendrá de los diferentes sensores e integrar el control predictivo que maneja el invernadero.

Para el desarrollo del código se lo realizó con el programa Sublime Text que es un editor de texto para diferentes códigos, con NodeJS se puede desarrollar aplicaciones web y utiliza JavaScript, también se puede utilizar para desarrollar apps. Node-JS es de una arquitectura asíncrona por lo que se considera un programa muy rápido para desarrollar aplicaciones en tiempo real.

### 3.1.3 Construcción del Servidor Web

El servidor está desarrollado en tres etapas principales los que son la adquisición de datos de los sensores ubicados en el invernadero, el manejo de una base de datos utilizando MongoDB y por último el control predictivo que permite tener un servidor dedicado para este fin dentro del invernadero. Todo esto está integrado dentro de una carpeta llamada **PAGINA** como se observa en la Figura 3.2 (a) esta carpeta contiene los módulos y librerías para el control y desarrollo del servidor, para que el servidor logre la comunicación con los sensores se integra la interfaz de los sensores dentro de la página **Public** que integra a la subcarpeta “Interface.js” en el cual se desarrolla el código de la aplicación se puede observar en la Figura 3.2 (b).

Figura 3.2 Código en Node.JS del servidor Web



Para lograr la comunicación se implementó un código dentro del módulo de ESP8266 este integra librerías que permiten el control de los diferentes sensores como el sensor de temperatura como se observa en la Figura 3.3. Dentro de este código está implementado en forma adicional la comunicación con el servidor utilizando la librería de aREST de arduino que facilita la interconexión en forma inalámbrica desde los sensores hacia el servidor principal.

Figura 3.3 Código Arduino de sensor del sensor DHT11

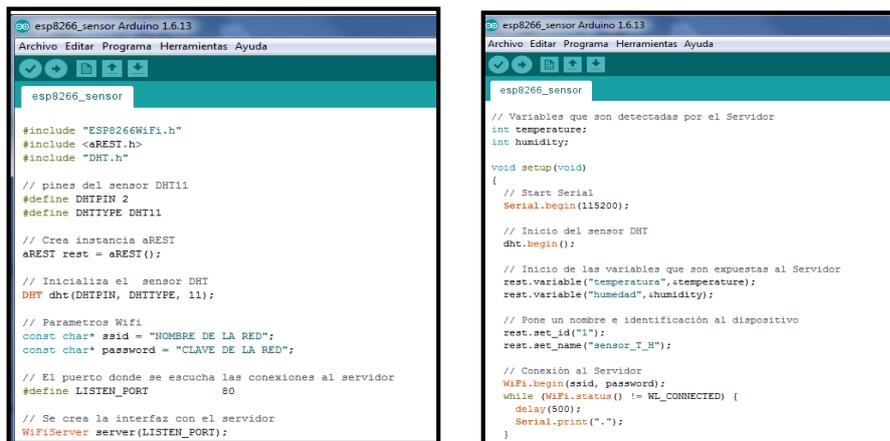
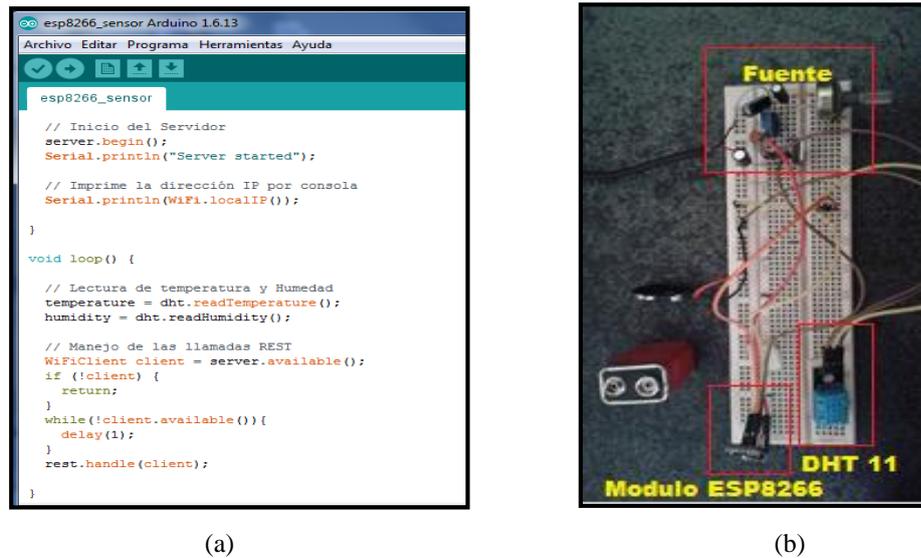


Figura 3.4: Código Arduino de sensor de Temperatura y sus componentes



(a) Continuación del programa para la lectura de datos al servidor, (b) circuito en protoboard del sensor DHT11 de temperatura con el módulo ESP8266. Autores: Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

### 3.1.4 Desarrollo y arquitectura para la toma de datos de los sensores

La implementación de los sensores en el servidor Web se observa en la figura 3.5 que está compuesto por funciones independientes tanto en tiempo y aplicación para cada servidor, lo que se tiene es un petición GET al servidor acompañado de una función realizada en java, esto permite que cuando reciba el dato puede realizar una función extra la cual es imprimir el valor de la lectura que para este caso es la temperatura.

Figura 3.5 Implementación de Sensores al Servidor

```
// Funcion para leer los datos
$(document).ready(function() {

// tiempo de muestreo del sensor 1
sensor1();
setInterval(sensor1, 8000);
// tiempo de muestreo del sensor 2
sensor2();
setInterval(sensor2, 3000);

});

function sensor1() {

$.get('/sensor_T_H/temperatura', function(json_data) {
  $("#temperatura").text('Temperatura: ' + json_data.temperatura + ' °C');

$.get('/sensor_T_H/humedad', function(json_data) {
  $("#humedad").text('Humedad: ' + json_data.humedad + ' %');
});
});

}

function sensor2() {

$.get('/sensor_T_H2/temperatura1', function(json_data) {
  $("#temperatura1").text('Temperatura1: ' + json_data.temperatura1 + ' °C');

$.get('/sensor_T_H2/humedad1', function(json_data) {
  $("#humedad1").text('Humedad1: ' + json_data.humedad1 + ' %');
});
});

}
}
```

Implementación de las funciones para los sensores dentro del servidor Web, Autores: Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

### 3.1.5 Visualización del Servidor

En la figura 3.6 se observa la pantalla principal de la interfaz y como esta se redirecciona la página de control, este diseño fue implementado en node.js con la base de datos de MongoDB.

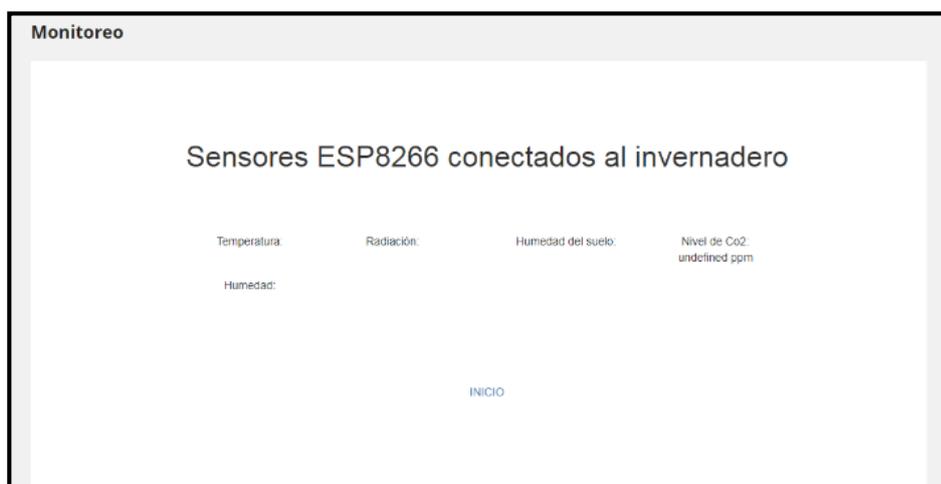
Figura 3.6 Visualización del Servidor



Página de visualización del servidor Web, Autores: Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

El servidor está constituido por dos partes que permiten la visualización de los datos cuando ingresamos al link Visitante como se observa en la figura 3.7. La parte de la administración se debe ingreso de la página de Administración que se observa en la figura 3.8 este nos permite administrar los diferentes eventos del invernadero como el manejo de temperatura y humedad, aparte de tener un control de riego con la implementación de variar los tiempos de suministro de agua que requiere la plantación.

Figura 3.7 Visualización de la Página de Monitoreo



Visualización de la interfaz del servidor web de página de visitante en donde es posible ver los valores de los sensores, Autores: Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

Figura 3.8 Visualización de la Administración de la Página de Monitoreo



The image shows a login form with the following fields and a button:

- Email**: Input field with placeholder text "Email".
- Username**: Input field with placeholder text "Nombre de Usuario".
- Contraseña**: Input field with placeholder text "password".
- Confirma Contraseña**: Input field with placeholder text "password".
- Iniciar Sesión**: A blue button to submit the login information.

Visualización del ingreso a la página de Administración. Autores: Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

Figura 3.9 Visualización del Monitoreo con control



The image shows a monitoring and control interface titled "Monitoreo". The main heading is "Sensores ESP8266 conectados al invernadero". Below this, there are four sensor readings:

- Temperatura:
- Radiación:
- Humedad del suelo:
- Nivel de Co2: undefined ppm

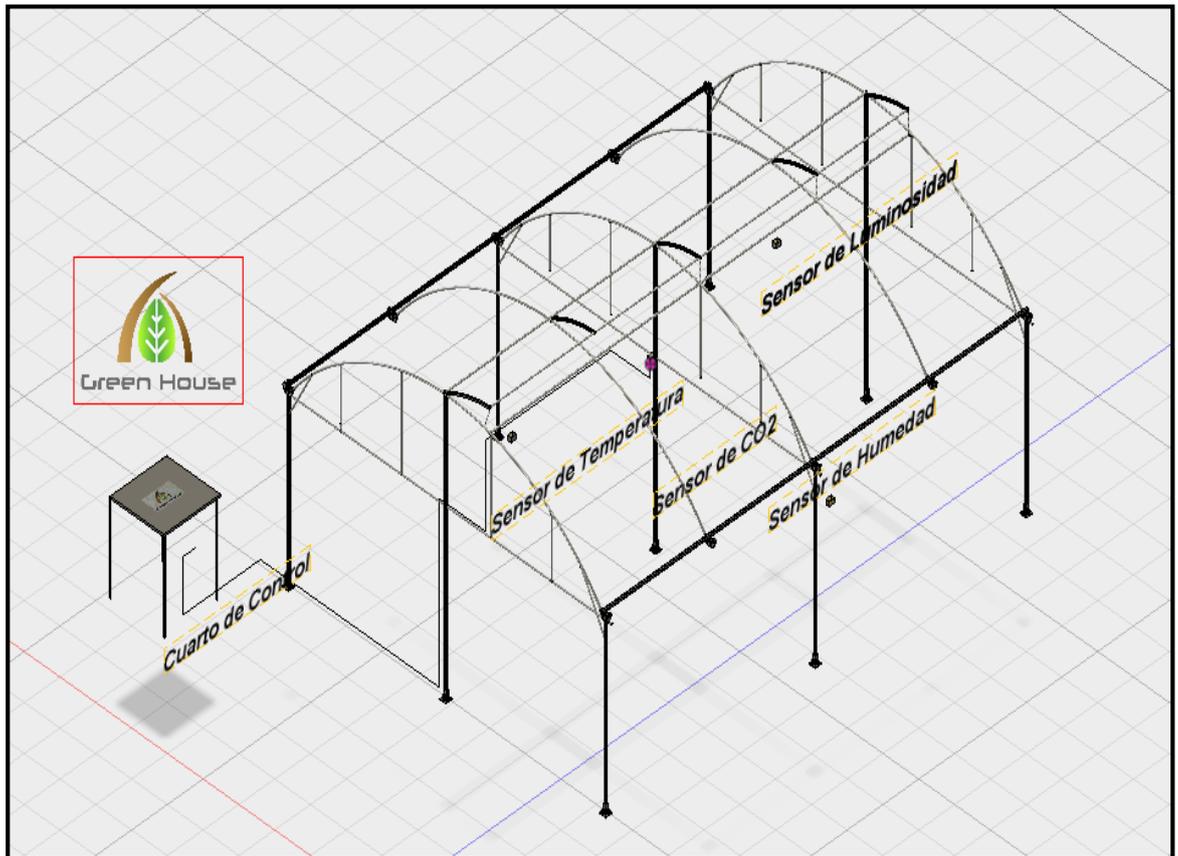
Below the sensor readings, there are four control buttons: "RIEGO", "CORTINA IZQUIERDA", "CORTINA DERECHA", and "VENTANA". At the bottom center, there is a blue "INICIO" button.

Visualización de página de administrador donde se muestran las opciones para a activación de cortinas, ventanas y riego. Autores: Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

### 3.2 DISEÑO DEL CONTROL PREDICTIVO

Dentro del desarrollo del proyecto se encuentra el diseño del sistema de monitoreo y control, conformado por los sensores y actuadores. Para ello se proporcionará un mapa de la ubicación de cada uno de los sensores a ser utilizados, así como el cuarto de control a donde llegarán y de donde saldrán las acciones de control a tomarse. En la siguiente figura se muestra el diseño estructural del invernadero.

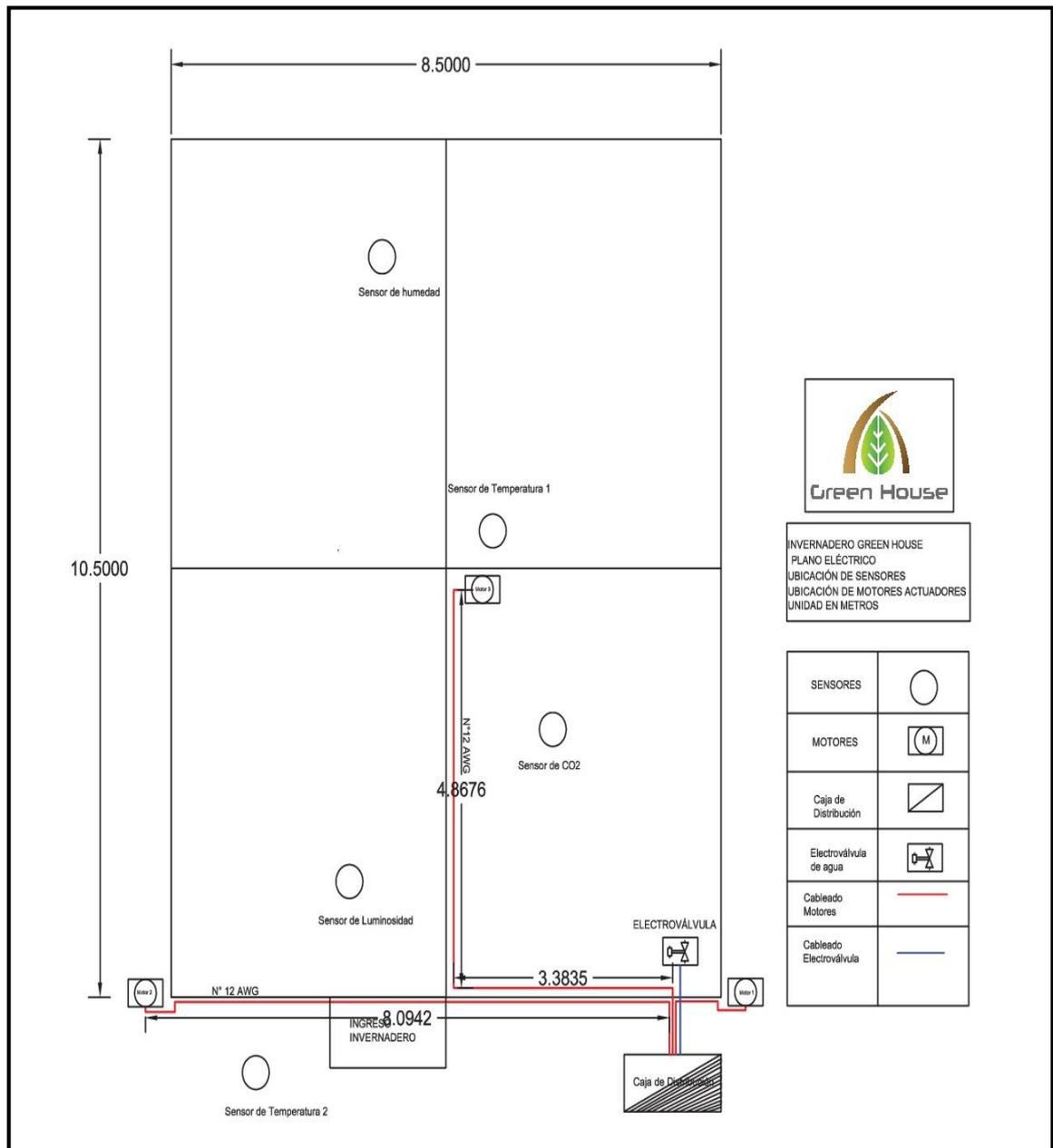
Figura 3.10 Estructura del Invernadero Green House



Diseño de la estructura y ubicación de sensores del invernadero desarrollado en Autodesk SimStudio Tool 2016, Autores Rojas. Luis y Veintimilla Joselyn.

La ubicación de los sensores dentro del invernadero así como el plano eléctrico se puede observar en la figura 3.11. Los sensores son de temperatura y humedad (Sensor DHT 11), sensor de CO2 (Sensor GM11), sensor de luminosidad (TSL 235 F) y el sensor de humedad del suelo (HL-69). El encapsulado de los sensores contiene un módulo Wifi ESP8266, su correspondiente sensor y batería. Las señales de estos, son enviadas vía Wireless hacia la Raspberry Pi 3 que se encuentra dentro del cuarto de control, esta se encarga del procesamiento de los datos obtenidos de los sensores y de la interconexión con el servidor web quien mostrará los valores en su página de monitoreo y en consecuencia recibir de retorno las acciones de control en caso de ser activados de forma manual desde la página web.

Figura 3.11 Plano Eléctrico del Invernadero Green House



Diseño del plano de ubicación de sensores del invernadero y plano eléctrico desarrollado en AutoCAD. Autores: Rojas. Luis y Veintimilla Joselyn.

### 3.3 MODELAMIENTO DEL INVERNADERO

En el invernadero es de vital importancia la consideración de las variables como la temperatura, la humedad y la cantidad de CO<sub>2</sub> ya que al variar drásticamente sus valores esto produciría estrés en las plantas lo que provocaría una disminución de la producción e incluso la muerte de la misma. Por ello es necesario tener un control efectivo de dichas variables conociendo las ecuaciones que describen a las mismas. Para empezar el desarrollo del control predictivo, como ya se ha mencionado antes es

necesario describir mediante ecuaciones el modelo de la planta las cuales son descritas a continuación.

### 3.3.1 Modelo de Temperatura

Para realizar el modelado de la temperatura es necesario evaluar varios factores, como son: la radiación solar, quien es la principal causante de la cantidad de temperatura presente en el invernadero, y la ventilación quien se encarga de evacuar el aire caliente en caso de que exista demasiada temperatura dentro del invernadero, cada uno de estos factores determina la temperatura interna del invernadero.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{X_{cap}} (F_{radiación} - F_{ventilación}) \quad \text{Ec (3.1)}$$

Donde:

$C_{cap,t}$  es la capacidad termica del aire del invernadero

$R_{radiación}$  es el flujo de energía que proviene del sol

$F_{ventilación}$  es el flujo de energía perdida por ventilación (Yassine, 2010)

### 3.3.2 Modelo de Humedad

La humedad presente en el suelo permite que la planta absorba nutrientes y sales necesarias para producir su propio alimento es decir la sabia bruta y de esta manera realice el proceso de la fotosíntesis de una manera correcta, además de ser el control de la humedad muy importante ya que demasiada humedad en el suelo produciría pudrición en la raíz y por el contrario la falta de agua produce resequedad y decaimiento en la plantación. Por ello las ecuaciones diferenciales correspondientes a la humedad tienen que ver con la transpiración de las plantas y la ventilación presente en el invernadero.

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{C_{humedad}} (\Phi_{aaporte riego} - \Phi_{h.ventilación}) \quad \text{Ec (3.2)}$$

Donde:

$C_{humedad}$  es la capacidad másica del aire del invernadero para la humedad.

$\Phi_{aaporte riego}$  es la humedad producida por el riego

$\Phi_{h.ventilación}$  es la pérdida de la humedad por ventilación (Yassine, 2010)

### 3.3.3 Modelo de la Concentración de CO<sub>2</sub>

La cantidad de CO<sub>2</sub> presente en el invernadero es de gran ayuda para la planta ya que incrementa el rendimiento de la misma al aumentar la velocidad del proceso de la fotosíntesis y la cantidad de producción de azúcar. Por ello los grandes agricultores destinan gran cantidad de tiempo y recursos en aumentar la cantidad de CO<sub>2</sub>. El modelo de la concentración de CO<sub>2</sub> en el invernadero depende del consumo y del aporte que realizan las plantas en el día y en la noche respectivamente y además de la ventilación.

$$\frac{dX_C}{dt} = \frac{1}{C_{cap,c}} (O_{aporte} - O_{ventilación}) \quad \text{Ec (3.3)}$$

Donde:

$C_{cap,c}$  es la capacidad de CO<sub>2</sub> del invernadero

$O_{aporte}$  es el aporte de CO<sub>2</sub> de la planta en promedio

$O_{ventilación}$  es la pérdida de CO<sub>2</sub> por la ventilación (Yassine, 2010)

### 3.3.4 Modelo de la Radiación

La radiación presente dentro del invernadero es uno de los factores necesarios para el proceso de fotosíntesis, la absorción de agua y el correcto desarrollo de la plantación su ecuación está en función del aporte de radiación menos el rechazo producido por la cubierta.

$$\frac{dX_C}{dt} = \frac{1}{C_{cap,c}} (R_{aporte} - R_{rechazo cubierta}) \quad \text{Ec (3.4)}$$

Donde:

$C_{cap,c}$  es el coeficiente de transmisión de la energía a través de la cubierta

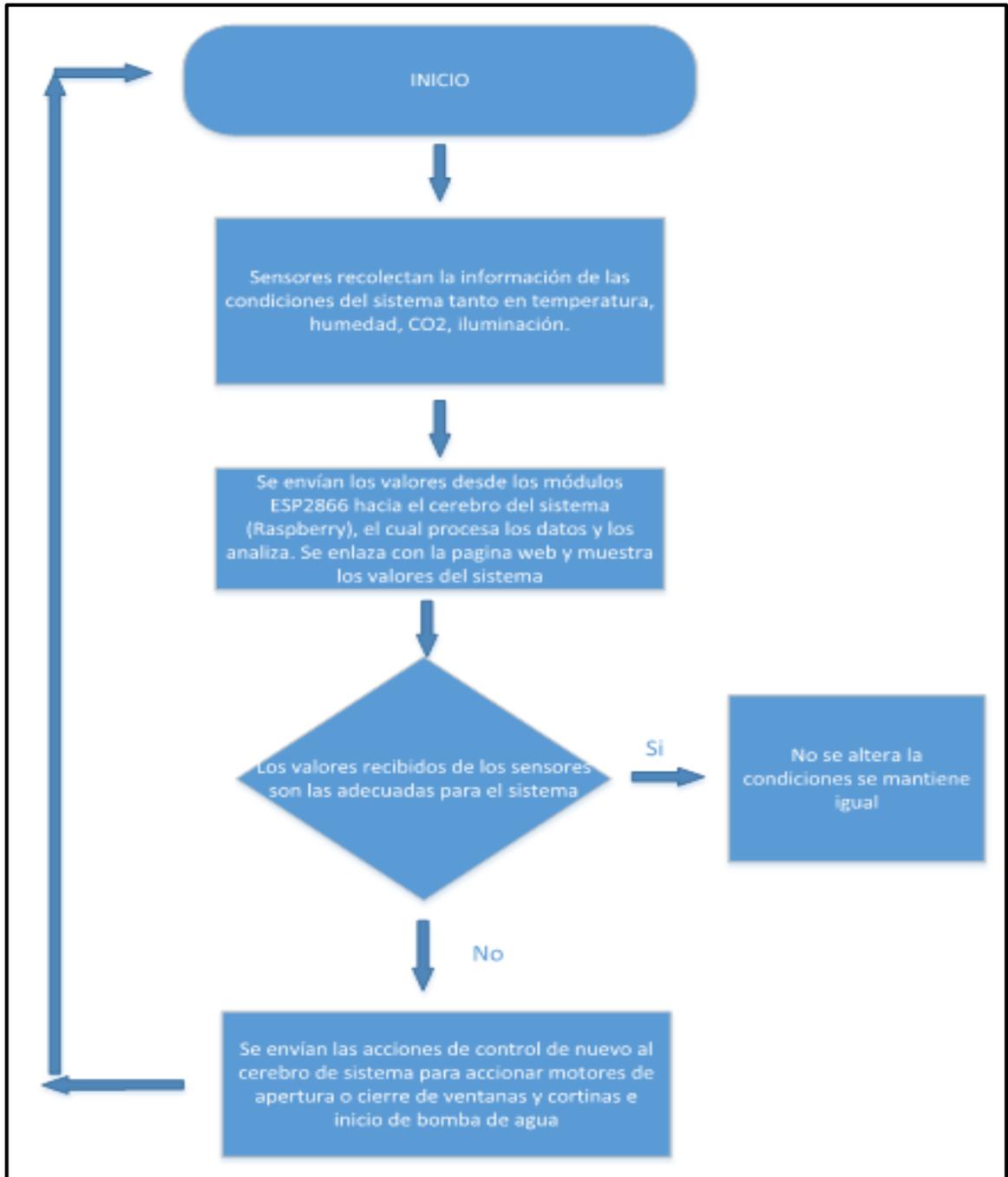
$R_{aporte}$  es el aporte de radiación que ingresa al invernadero

$R_{rechazo cubierta}$  es el valor de radiación que no ingresa por cualidades del pastico

### 3.4 ESTRUCTURA DEL CONTROL

El diagrama de flujo del proceso a realizarse en la planta se muestra en la figura 3.12 donde se destaca la acción de control a tomarse dependiendo de las condiciones presentes en el sistema.

Figura 3.12 Diagrama de flujo de la planta



Proceso de funcionamiento de la planta realizado en Visio 2013. Autores: Luis Rojas y Joselyn

Veintimilla

Dentro del proceso implementado intervienen los siguientes sensores y actuadores, especificados en las tablas a continuación.

Tabla 3.1. Descripción del procesador

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Raspberry	Raspberry PI 3 Model B
	Alimentación: 3.3 V
	Velocidad del procesador: 1200 MHz
	Tamaño: 12,2 x 7,6 x 3,4 cm
	Capacidad de la memoria RAM: 1GB
	Tipo de conexión inalámbrica: 802.11 B/B

Tabla 3.2. Descripción de Sensores

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Temperatura	Modulo sensor de temperatura DHT11
	Alimentación: 3-5.5 VDC
	Rango de medición: 0-50 °C
	Tamaño: 12*15.5*5.5 mm
Humedad	Modulo sensor de Humedad del suelo HL-69
	Alimentación: 3-5.5 VDC
	Corriente: 35 mA
	Tamaño: 60 x 30 mm
CO2	Sensor de CO2 MG811
	Alimentación: 6 VDC
	Rango de medición: 0-50 °C
	Tamaño: 32*22*27 mm
Luminosidad	Sensor de Radiación/Luminosidad TSL235
	Alimentación: 5 VDC
	Rango de medición: $E_e = 375 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,
	Tamaño: 32*22*27 mm

Tabla 3.3. Descripción de Módulo de Comunicación

Comunicación	Módulo Wifi ESP8266
	Protocolo 802.11b
	Alimentación: 3.3 VDC
	Tamaño: 14.3*24.8 mm
	Capacidad: 1 MB de memoria flash

Tabla 3.4. Descripción de Actuadores

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Motor 1 y 2	Motor AC Monofásico
	Alimentación: 110 VAC
	Hmax: 35 m
	Qmax: 35 L/min
	HP: 0.5 HP
Motor 3	Motor AC Trifásico
	Alimentación: 110 VAC
	Hmax: 35 m
	Qmax: 35 L/min
	HP: 0.5 HP
Bomba de agua	Bomba Tritón
	Alimentación: 110 AC
	Hmax: 35 m
	Qmax: 35 L/min
	HP: 0.5 HP

Descripción de los elementos involucrados en la planta. Autores: Luis Rojas y Joselyn Veintimilla

### 3.4.1 Diseño del controlador

El tipo de control predictivo usado para esta implementación es MPC que es un control predictivo basado en modelos mantiene la forma:

$$x(t + k) = Ax(t) + Bu(t) \quad \text{EC(3.5)}$$

$$y(t) = Cu(t) \quad \text{EC(3.6)}$$

Donde:

$x(t)$  el vector de estados del sistema

$y(t)$  es la salida del sistema

$u(t)$  es la entrada del sistema.

Las variables han sido analizadas de manera independiente es así como la temperatura, la humedad, la cantidad de CO<sub>2</sub> y la luminosidad (expresada en radiación), tienen cada una la ecuación correspondiente a su modelo basado en las variaciones explicadas anteriormente, sin embargo para el proceso de control predictivo se tomaran en cuenta los valores de temperatura, humedad y cantidad de CO<sub>2</sub>, ya que por la estructura interna del invernadero y políticas de la empresa aun no es posible implementar sistemas que controlen parámetros de radiación dentro del invernadero.

El proceso ha sido simulado en primer lugar en Matlab de manera que al implementarlo en Python se tenga una comparación del sistema simulado y cómo reacciona en el proceso implementado.

### 3.4.2 Simulación en Matlab

Una de las plataformas más importantes y estables en cuanto a desarrollo de sistemas matemáticos es Matlab por ello que se realiza la simulación del sistema el control predictivo en el mismo. La simulación realizada y los datos obtenidos fueron desarrollados en una PC independiente de la Raspberry pero en condiciones iguales a la de esta.

El sistema cuenta con la entrada de la ecuación de estado obtenida de la función de transferencia a partir de las variables registradas en el invernadero.

Figura 3.13 Programa realizado en Matlab

```

close all;
clear all;
clc;
%-----modelo del sistema-----%
T=0.5;
numerador=1;
denominador=[0.1 1.1 1];
retraso=0.41;
fun_temp=tf(numerador,denominador);
gp.outputdelay=retraso;
ftz=c2d(fun_temp,T);
[B,A]=tfdata(ftz,'v');
d=1;
%-----Ajustes de control-----%
N=5;
lamda=1;
delta=1*eye(N);
fun_temp_i=stepinfo(fun_temp);
P=10;
%-----Vector Gi-----%
gi=step(ftz);
Nm=length(gi)-1;

%-----Matriz G-----%
G=zeros(P,N);
G(:,1)=gi(1+d:P+d);

```

Figura del Programa de control predictivo desarrollado en Matlab. Autores: Luis Rojas y Joselyn Veintimilla

Una vez ingresada la función y declaradas variables para el control se prosigue a realizar el cálculo de las predicciones tomando en cuenta los valores pasados y presentes y así tener un valor futuro.

Figura 3.14 Programa realizado en Matlab

```

for k=9:nit-w
%calculo de salida del proceso
ym(k)=B(1)*u(k-1)+B(2)*u(k-2)+B(3)*u(k-3)-A(2)*ym(k-1)-A(3)*ym(k-2)+do(k);
%calculo de respuesta libre
f=zeros(1,P);

for kk=1:P
for i=1:Nm-P
vect_g(i)=gi(kk+1)-gi(i);
end
for i=Nm-P+1:Nm
vect_g(i)=gi(Nm)-gi(i);
end
f(1:P)=ym(k)+vect_g*dof';
end
inc_u=K1*(r(k+w)-f');

if k==1
u(k)=inc_u;
else
u(k)=u(k-1)+inc_u;
end

aux_u=u_ant(1:length(B)-1);
u_ant=[u(k) aux_u];

aux_2=dof(1:Nm-1);
dof=[inc_u aux_2];

```

Programa de control predictivo desarrollado en Matlab. Autores: Luis Rojas y Joselyn Veintimilla

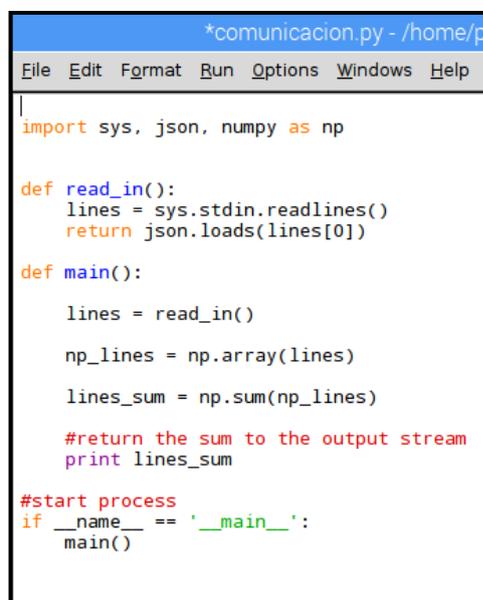
Los valores mostrados en la figura son los valores del controlador con respecto a la temperatura, en Python se realizara para las 2 variables controlables consideradas en el proceso.

### 3.4.3 Implementación en Python

Python es la herramienta matemática análoga a Matlab usada en la Raspberry Pi 3. Posee una gran variedad de librerías que permiten realizar los diferentes procesos matemáticos tanto de simulación como de implementación. En nuestro paso el primer paso a seguir es la comunicación entre Python y la base de datos desarrollada en Node JS, para que en lo posterior se pueda enviar los datos tomados del sistema de la planta mismo a cualquier parte en donde se tenga el servidor.

La comunicación se realiza mediante la importación de las librerías Json (se enlaza con Node JS) y Numpy (permite realizar cálculos matemáticos) de manera que el servidor se comunique con Python y le envíe los datos pertinentes para que este realice el proceso de predicción y control.

Figura 3.15 Visualización del programa Python



```
*comunicacion.py - /home/pi
File Edit Format Run Options Windows Help
|
import sys, json, numpy as np

def read_in():
    lines = sys.stdin.readlines()
    return json.loads(lines[0])

def main():
    lines = read_in()
    np_lines = np.array(lines)
    lines_sum = np.sum(np_lines)

    #return the sum to the output stream
    print lines_sum

#start process
if __name__ == '__main__':
    main()
```

Figura de comunicación entre Node JS y Python. Autores: Luis Rojas y Joselyn Veintimilla

Una vez captados de valores de los sensores desde Node JS hasta Python se procede a la realización del cálculo de las condiciones pasadas y presentes y así tomar una acción en el futuro.

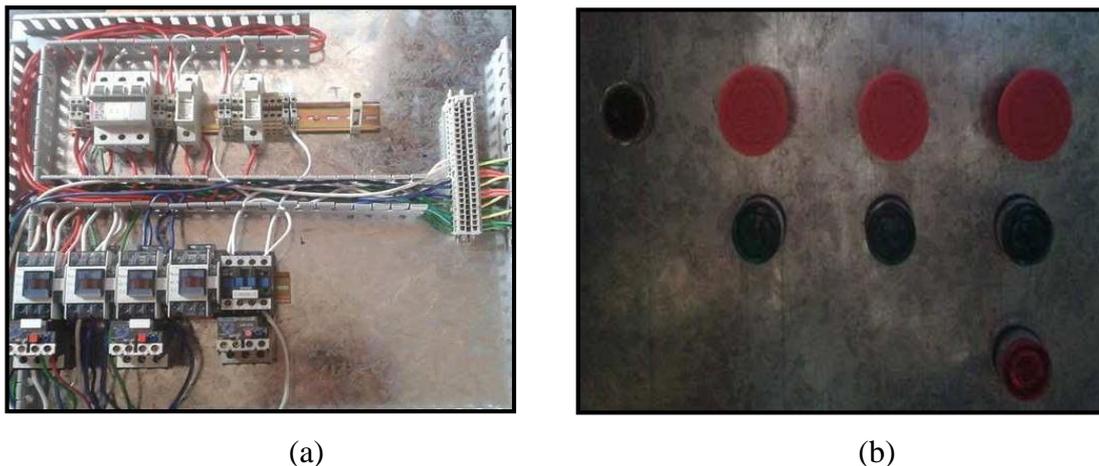
### 3.5 CONTROL MANUAL

Uno de los recursos de un control efectivo es el poder activar el sistema a partir del accionamiento manual es por ello que se realizó la conexión manual del sistema con la siguiente lógica de funcionamiento.

El funcionamiento de control manual se basa en el accionamiento de cuatro motores, un trifásico y tres monofásicos activados mediante contactores. El motor trifásico es el que activa la ventana de la parte superior, cuenta con un botón de subida, bajada y paro en caso de emergencia, estos tres botones debido a que no presenta enclavamiento. Caso contrario sucede con los motores monofásicos los cuales levantan las cortinas laterales estos poseen enclavamiento por lo que se ha colocado un botón de paro y subida, no presenta botón de bajada ya que debido al tipo de mecanismo realizado no requiere de accionamiento para bajar. Ambos circuitos están protegidos con finales de carrera para detener su accionamiento una vez que llegan a la posición deseada.

El tercer motor monofásico es el encargado del accionamiento de la bomba de agua por lo que se ha colocado un selector para la activación y desactivación del circuito. El tablero con las conexiones deseadas se muestra en la figura 3.16.

Figura 3.16 Tablero de accionamiento manual



Gráfica de instalación de tablero de accionamiento manual. (a) Cableado interno de conexiones de actuadores, (b) vista frontal del tablero con los botones de accionamiento manual Autores: Luis Rojas y Joselyn Veintimilla

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos del proceso de telecontrol predictivo así como del análisis de tráfico obtenido antes y después de la implementación de la plataforma en la página web de la empresa “GREEN HOUSE” [www.greenhouseec.com](http://www.greenhouseec.com). Dentro del telecontrol se analizarán los medidas de efectividad del sistema es decir si los parámetros de apertura y cierre de ventana principal, apertura y cierre de persianas y activación de riego funcionan de manera correcta, así como el envío de los datos tomados por los sensores y mostrados en la página web en tiempo real. Por parte del control predictivo se analizará la correcta predicción de los valores en cada caso de temperatura, humedad, radiación y cantidad de CO<sub>2</sub>.

#### 4.1 ANÁLISIS DE TRÁFICO

Para la realización del análisis de tráfico se han tomado varios aspectos como la actividad de la página principal de la empresa y la carga que ha generado la implementación del nuevo sistema hacia la página por lo que el análisis ha sido desglosado en dos partes, lo primero para entender el funcionamiento de la página web de la empresa se utilizó el programa WEBPAGETEST siendo este un análisis online de código libre que es apoyado por Google, el cual permite entender los tiempos de carga de datos y los tipos de datos que están siendo ejecutados en un instante de tiempo, a sabiendas que el análisis de tráfico debe aportar el comportamiento de la página web y el comportamiento con la nueva plataforma añadida al servidor web de la empresa.

##### 4.1.1 Análisis de la Página Web [greenhouseec.com](http://greenhouseec.com)

Es fundamental entender los parámetros y métricas del funcionamiento de la página de Green House para lo cual se utilizó el programa WEGPAGETEST teniendo como resultado una carga total de los datos en un tiempo de 7.75 segundo como se puede observar en la figura #, teniendo en cuenta que para la presentación de la página principal se utiliza 28 recursos con cargas variadas como se puede observar en la figura 4.1, se puede determinar que el tiempo de carga es grande en comparación con otras páginas , sin embargo se podría mejorar realizando algunos ajustes a la plataforma de

la página web de la empresa, además se puede ver que la carga total de memoria ocupa 2680 kb esto es aproximadamente 2.7 Mb y analizando los datos del hosting contratado por la empresa se tiene una capacidad de espacio de 216 Mb.

Figura 4.1 Métricas de Carga de la Página Green House

	Load Time	First Byte	Start Render	Visually Complete	Speed Index	First Interactive (beta)	Result (error code)	Document Complete			Fully Loaded			
								Time	Requests	Bytes In	Time	Requests	Bytes In	Certificates
First View (Run 1)	7.757s	0.222s	3.056s	7.900s	5110	3.104s	99999	7.757s	27	2,646 KB	7.914s	28	2,680 KB	3 KB

Figura donde se observa los tiempos de carga y los valores totales de carga de la página de la empresa Green House utilizando el programa WEBPAGETEST. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

Figura 4.2 Métricas de los recursos utilizados en la Página Green House

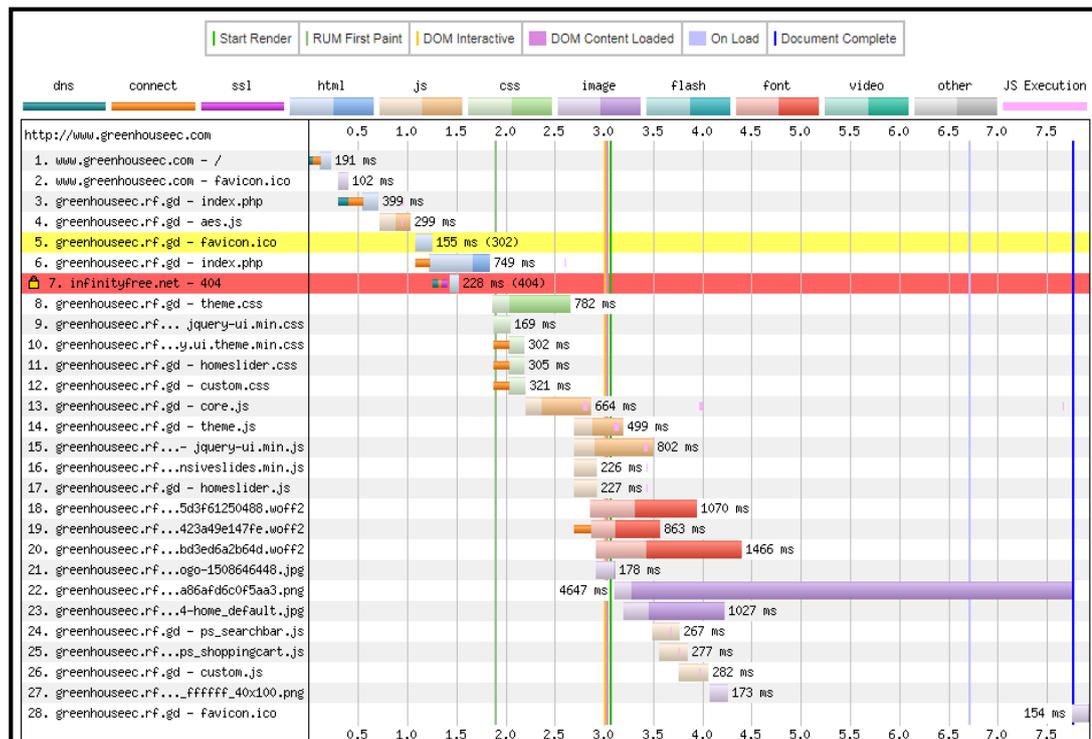


Figura donde se observa los recursos de la página de inicio de la empresa Green House y los tiempos de carga de cada recurso obtenidos con el programa WEBPAGETEST. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

Además de medir estos parámetros se utilizó el programa Networx el cual permite determinar el Data Rate que se entendería como el volumen total de datos en un segundo, este parámetro nos permite determinar cuándo de los recursos de ancho de banda de una red ocupa, además se puede observar el comportamiento de tráfico cursado, estos datos son tabulados en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Valores medidos de Data Rate Maquina externa 1

Explorador	Data Rate	Unidad
Internet Explorer	565	kB/s
Chrome	540	kB/s
Mozilla	540	kB/s

Tabla de datos de los Data Rate tomados en diferentes exploradores en una Laptop Externa utilizando el programa Networx. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

Tabla 4.2 Valores medidos de Data Rate Maquina Externa 2

Explorador	Data Rate	Unidad
Internet Explorer	400	kB/s
Chrome	350	kB/s
Mozilla	350	kB/s

Tabla de datos de los Data Rate tomados en diferentes exploradores en una PC de Escritorio Externa utilizando el programa Networx. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

Tabla 4.3 Carga de Volumen de datos de Páginas

Relación Paginas	Data Rate	Unidad
Página Green House	457.5	kB/s
Página Monitoreo y Control	1.5	kB/s

Tabla de datos donde se relacionan los parámetros de carga de datos de la página principal y la página implementada de monitoreo y control. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn

#### 4.1.2 Análisis de la plataforma de monitoreo para Green House

Para el análisis de la plataforma que se diseñó para Green House se realizó el estudio utilizando el programa Networx, el cual para comprender el Data Rate que tiene o aporta solo la implementación se utilizó una sola red que tiene Green House para servicios adicionales, el cual se desconectó todo dispositivo, dejando conectado a la red únicamente la Raspberry pi donde se encuentra montado el servidor web implementado, obteniendo como resultado una carga de datos que bordea los 2 kbps con esta métrica se puede saber el aporte adicional que tendría la página web de la empresa al montar el servidor de monitoreo y control, lo interesante de esta prueba es que el aporte de carga es muy baja en comparación a la página que tiene implementado

Green House siendo este valor fue del 0.5 % este se obtuvo sacando un promedio de las cargas de datos de las pruebas de los diferentes ordenadores con diferentes exploradores y el valor de la métrica del Data Rate del servidor montado en la Raspberry Pi.

Figura 4.3 Análisis de Data Rate del servidor web



Figura donde se observa el Data Rate de 1.5 KB/s del servidor web montado para la empresa Green House. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

#### 4.1.3 Análisis y Aportación de los sensores al servidor

Los sensores montados para el monitoreo del servidor web son inalámbricos utilizando el estándar 802.11 y es fundamental analizar cómo influye los volúmenes de datos dentro de la red interna para lo cual se tomaron métricas del comportamiento de la red de los sensores utilizando el programa Acrylic Wifi Professional y lo interesante es que el consumo tanto de energía como de carga en la transferencia de datos es baja como se puede observar en la figura 4.4. Esto se debe en gran parte a la forma como fueron programados cada sensor para poder lograr transmitir los datos dentro de ciertos periodos. El período de muestreo tomado para este análisis fue de 30 días, sin embargo los días en donde se encontró la mayor cantidad de tráfico se registró los días domingos siendo estos los más recurrentes debido a que la empresa realiza sus actividades comerciales los fines de semana y da a conocer sus formas de contactarse.

Figura 4.4 Sensores conectados al servidor web

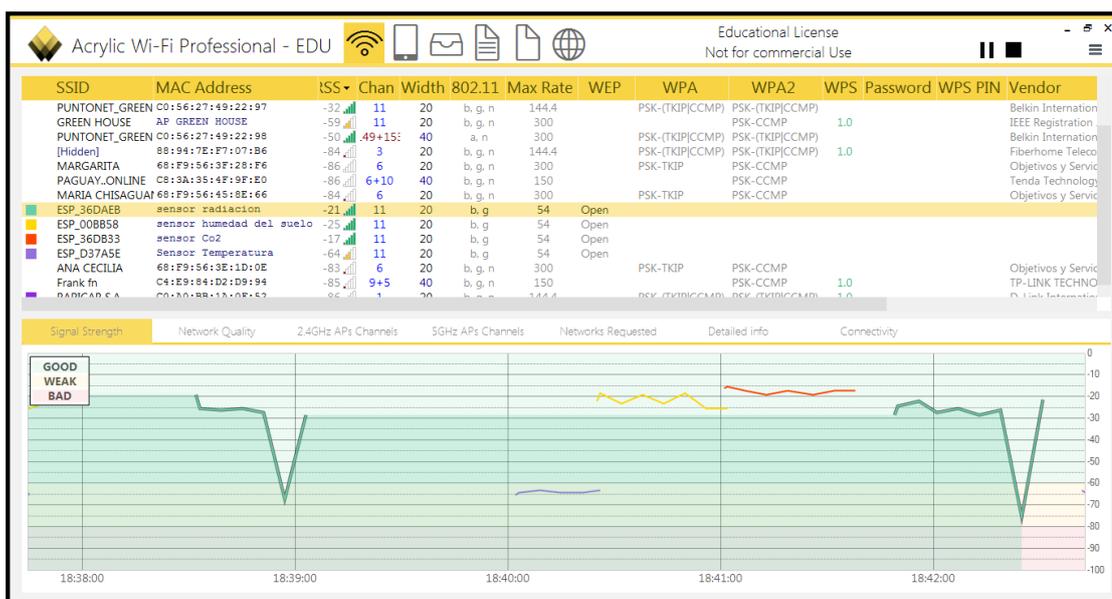


Gráfico donde se observa el comportamiento del sensor de temperatura (color verde) conectado al servidor, el cual solo transmite información en intervalos de tiempo cortos. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

Como se observa en la figura 4.4 los sensores fueron montados con un comportamiento de sleep el cual le permite dejar libre el ancho de bando y solo transmitir la información por el lapso de 30 segundos cada 2.33 minutos, esto permite ahorrar tanto la cantidad de energía que utiliza cada sensor como favorecer a liberar el ancho de banda que se tiene para la implementación de la red interna de los sensores conectados al servidor web.

#### 4.1.4 Tecnología Clouding

Dentro de la visión tecnología de la empresa, está el ofrecer servicios de monitoreo y control dentro de su página web y así ofrecer un servicio de SaaS de manera que el implementar un sistema eficiente dentro de sus propios invernaderos también sea posible ofrecer este servicio a empresas con actividades agrícolas similares a las consideradas para este trabajo. Los planes iniciales se encuentran en la página web como se muestra en la figura 4.5 con los combos de servicios que ofrece.

El implementar un sistema de software como servicio permitirá dar una nueva tendencia tecnológica e incrementar la tendencia del clouding, aportando de esta forma al desarrollo de investigación y servicio que ofrece la empresa, tomando en cuenta que

el desarrollo de este prototipo puede mejorarse para ser robusto y obtener los resultados deseados con la plataforma.

Figura 4.5 Propuesta de Sistema de Monitoreo y control de la empresa Green House



Página web de la empresa donde se muestra las alternativas de monitoreo y control de invernaderos. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

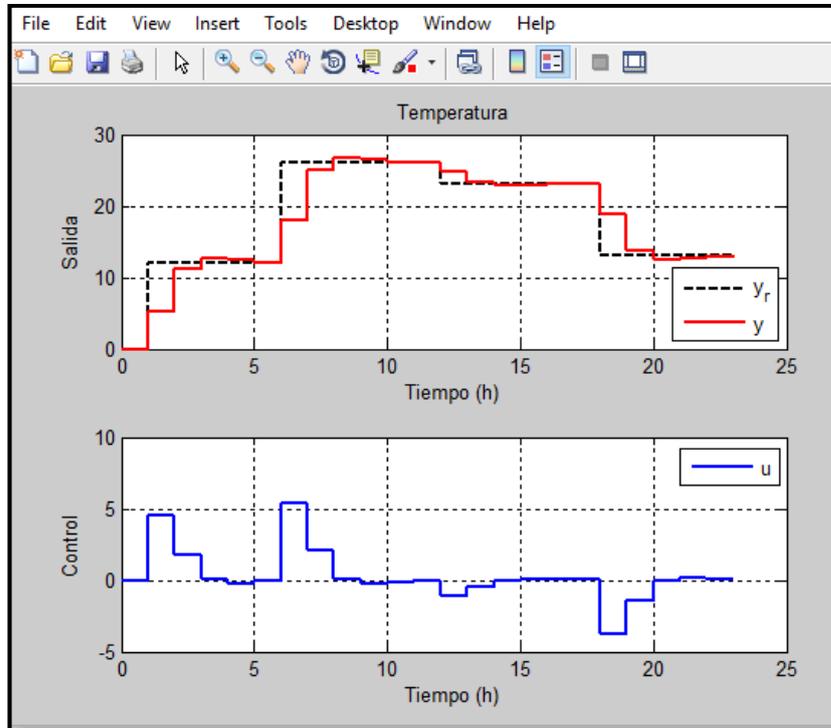
Tomando en cuenta todos los parámetros involucrados en el desarrollo de la plataforma, se podrá integrar en un futuro nuevas tecnologías, las cuales permitan que se mejoren los servicios actuales que se conocen en el país. Dando como resultado un nuevo enfoque a la agricultura tradicional, con lo que este aporte permitirá tener herramientas para mejorar cultivos cuidando el medio ambiente por la disminución de pesticidas y ahorrando recurso como el agua, y la electricidad. La inclusión de este tipo de tecnología le brindará al país un mejor competitividad dentro del mercado, tanto nacional como internacional.

## 4.2 ANÁLISIS DEL CONTROLADOR PREDICTIVO

Para analizar los datos obtenidos del control predictivo se tomará como ejemplo las predicciones hechas para la temperatura. Los resultados conseguidos a través de la simulación realizada en Matlab se muestran en la siguiente figura en donde se puede ver como la señal de salida “Ym” (señal de color rojo) que es la temperatura predicha, se mantiene bordeando la señal de Set Point propuesta (señal de color negro), siendo esta la temperatura ideal para el invernadero, mientras que en la parte inferior se

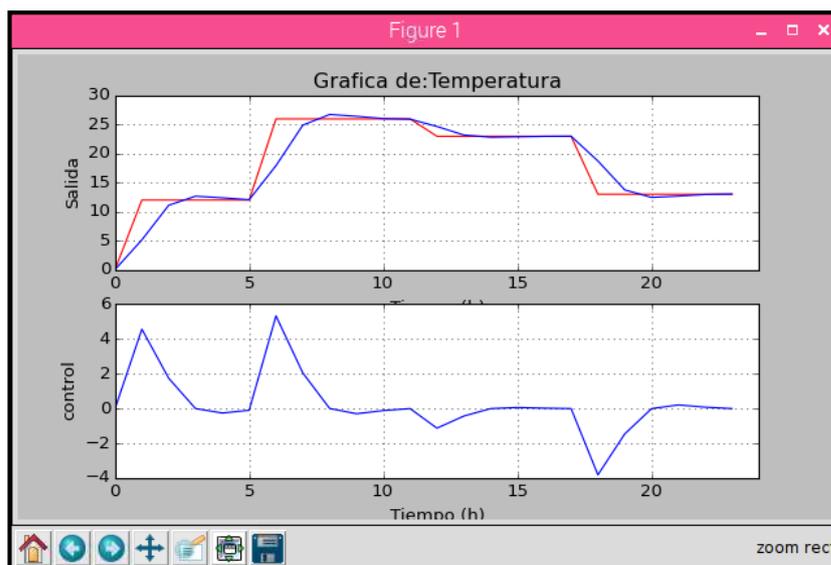
muestra la señal del controlador la cual se activa dependiendo de las variantes que ocurran en la salida  $Y_m$ .

Figura 4.6 Control Predictivo en Matlab



Gráficas obtenidas del controlador predictivo desarrollado en Matlab. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

Figura 4.7 Control Predictivo Python

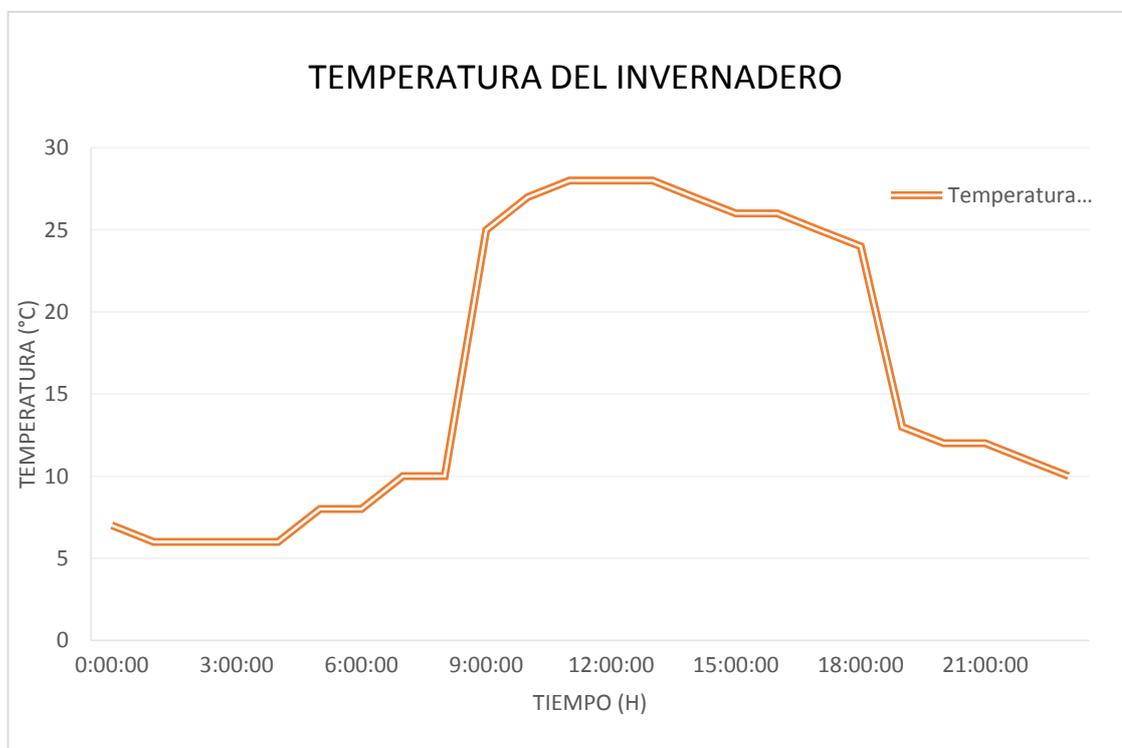


Gráficas obtenidas del controlador predictivo desarrollado en Python. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

Además en la comparación entre ambas graficas se puede ver cómo estas registran valores muy similares en cuanto a la salida de predicción “Ym” con un error de 0,00001885 %. Como ejemplo se toma el valor de Set Point de 25 ° mientras que el controlador de temperatura lo establece en 24,93° como se puede ver en la Tabla 4.4 de la comparación de los controladores. En cambio con la gráfica del control “u” se puede observar que difiere en gran manera por la forma natural de graficar en Python con la librería Matplotlib la cual fue utilizada para la realización de gráficos en Python 3, sin embargo al tomar los valores estos presentan una gran semejanza teniendo un error de 1.78 % por lo que se considera que la implementación en Python obtuvo muy buenos resultados. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 1 y 2 respectivamente.

En la figura 4.8 se muestran los valores obtenidos por el invernadero del mes de Agosto durante un periodo de 30 en los cuales al sacar un promedio de valores permitió obtener un valor de referencia para cada hora. De esto se puede ver que su valor no supera los 28 °C, sin embargo presenta un gran salto de valores a las 9 de la mañana siendo este un punto crítico para el sistema gracias a la implementación del controlador

Figura 4.8 Temperatura interna del invernadero



Gráfica de la temperatura interna del invernadero Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

Tabla 4.4 Comparación de Salida Ym entre Matlab y Python

Salida Matlab (Ym)	Salida Python (Ym)	Error (%)
0	0	0
5,1184	5,11841239	0,000242067
11,0984	11,09842992	0,000269588
12,6579	12,65785963	-0,000318932
12,3827	12,38270786	6,34756E-05
12,0504	12,05040422	3,50196E-05
17,935	17,93499104	-4,99582E-05
24,9269	24,92688252	-7,01251E-05
26,7647	26,76468503	-5,59319E-05
26,4485	26,44851652	6,2461E-05
26,06	26,0599888	-4,29778E-05
25,9576	25,95758576	-5,48587E-05
24,6955	24,6954513	-0,000197202
23,222	23,22203916	0,000168633
22,8379	22,83788763	-5,41644E-05
22,9057	22,90571045	4,56218E-05
22,9876	22,98758639	-5,92059E-05
23,009	23,00899204	-3,45952E-05
18,7399	18,7399006	3,20172E-06
13,752	13,75200239	1,73793E-05
12,4513	12,45128488	-0,000121433
12,6808	12,6807851	-0,000117501
12,9579	12,95795769	0,000445209
13,0304	13,03043607	0,000276813
	<b>Error Total</b>	1,88577E-05

Tabla de resultados de la salida de predicción del controlador implementado en Matlab y Python.

Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

Tabla 4.5 Comparación del control u entre Matlab y Python

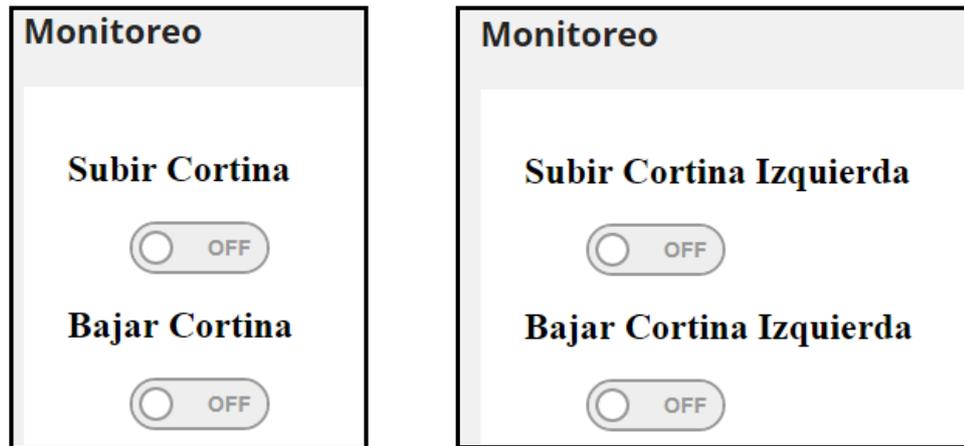
Control Matlab (u)	control Python (u)	Error (%)
0	0	0
4,57	4,570011	0,0002407
1,7461	1,74613016	0,00172725
0,0015	1,49E-03	-0,85659388
-0,2538	-2,54E-01	-0,00201777
-0,0972	-9,72E-02	-0,00609677
5,3315	5,33151174	0,0002202
2,0512	2,05124623	0,00225375
0,0071	7,15E-03	0,63230491
-0,2961	-2,96E-01	-0,00676844
-0,1142	-1,14E-01	-0,02118925
-0,0005	-4,97E-04	-0,61533785
-1,1261	-1,12606038	-0,00351846
-0,4302	-4,30E-01	-0,00526364
-0,0003	-3,39E-04	11,4113246
0,0625	6,25E-02	0,05695826
0,0239	2,39E-02	0,18702237
0	0,00E+00	0
-3,8118	-3,81181544	0,00040506
-1,4564	-1,45644129	0,00283499
-0,0012	-1,24E-03	3,44096801
0,2117	2,12E-01	-0,00538716
0,0811	8,11E-02	-0,03793128
0,0001	1,40E-04	28,6305413
	<b>Error Total</b>	1,78361237

Tabla de resultados del control del sistema implementado en Matlab y Python. Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

#### 4.2.1 Resultados de la implantación del control Remoto del sistema

La implementación del control remoto manual se puede ver en las siguientes figuras en donde al activar los botones estos realizan la activación o desactivación de los actuadores del sistema como son: apertura y cierre de ventana principal, apertura y cierre de cortina derecha e izquierda y activación del sistema de riego.

Figura 4.9 Controladores Remotos del servidor web



(a)

(b)



(c)



(d)

Fig. Gráficas de activación y desactivación de controladores remotos ubicados en la página web de la empresa [www.greenhouseec.com/monitoreo/administrador](http://www.greenhouseec.com/monitoreo/administrador). (a) Activación ventana principal. (b) Activación ventana derecha. (c) Activación ventana izquierda. (d) Activación de bomba de riego.

Autores Rojas Luis y Veintimilla Joselyn.

La activación de los controles en forma manual le permite al sistema tener redundancia del proceso, de manera que al presentarse cualquier falla en algún momento del controlador, también es posible activarlo de forma manual, dentro y fuera del invernadero evitando de esta manera que el usuario deba estar en el espacio físico para tener el control de su plantación lo que representa un ahorro de tiempo y recursos.

## CONCLUSIONES

En el presente proyecto de titulación se desarrolló un sistema de telecontrol que permite manejar un invernadero de forma automática y manual, así como un control que responda de manera eficiente a las diferentes variaciones de las condiciones. El controlador fue implementado en una Raspberry Pi 3 en la plataforma matemática Python la cual es equivalente a Matlab, permitió enviar las señales permitentes para la activación de los diferentes actuadores del sistema a través de los GPIOs. El invernadero fue monitoreado por 25 días en la bitácora de la empresa para así obtener los datos necesarios a ser registrados en las ecuaciones del sistema. El accionamiento remoto aportó en gran manera a realizar las pruebas de funcionamiento adecuado ya que al no ser necesario estar presente en el invernadero para accionar los diferentes actuadores esto ayudó a mantener un control efectivo de las condiciones de la planta las 24 horas del día. El programa del controlador fue realizado tanto en la plataforma matemática Matlab y Python de donde como se muestra en las tablas de resultados 4.4 y 4.5 existe un error del 1,78 % y 1,88 % respectivamente siendo este producido por el tipo de procesamiento de cada programa. Sin embargo el sistema implementado en la Raspberry Pi 3 en Python facilitó el manejo del invernadero ya que al no ser necesario que el personal esté presente en las instalaciones del mismo se lograron minimizar recursos y aumentar los tiempos de actuación frente a las diferentes condiciones y variaciones dentro del micro clima dentro del invernadero.

Para el diseño de la plataforma de enlace de datos entre la página web y el sistema se desarrolló el servidor web de manera que la información recibida por los sensores esté disponible en tiempo real en la página web de la empresa a la cual se puede acceder en cualquier instante. Este servidor fue desarrollado en NodeJS el cual cuenta con una base de datos montada en MongoDB, esto permite que la página sea liviana y rápida de manera que pueda interactuar con la página web principal de la empresa, las pruebas hechas al servidor para conocer la estabilidad del sistema fueron supervisadas por un periodo de 30 días, con estas pruebas se puede determinar que la plataforma montada está trabajando bajo los requerimientos planteados para este proyecto. En cuanto a la cantidad recursos que generaría el añadir una página de monitoreo dentro de la página web de la empresa como se muestra en la tabla 4.3 se puede ver que el añadido no influye en gran manera ya que apenas presenta un Data Rate de 1,5 KB/S mientras que

la página principal tiene un valor de 457.5 KB/s; de estos valores se puede concluir que es factible el agregar el sistema sin ningún inconveniente.

Dentro del análisis de tráfico se observó que el volumen de transferencia de datos que aportó el servidor implementado para el monitoreo y control del invernadero en la página web de la empresa ronda solo el 0.5 % de carga adicional como se puede observar en la tabla 4.3 la cual nos permite sacar la relación de volumen de carga entre el servidor principal y el servidor implementado, siendo este un aporte aceptable para la empresa y no satura en ningún momento las aplicaciones que están implementadas en el servidor principal.

Para la verificación del funcionamiento del sistema se evaluó la implementación de los sensores en los cuales se observó que estos transmiten su información dentro de un valor significativo de tiempo los cuales fueron programados para enviar información por 30 segundos cada 2.33 minutos como se observa en la figura 4.4, permitiendo de esta forma ahorrar ancho de banda mejorando la red interna, y a su vez dar mayor durabilidad de energía a las baterías de los diferentes sensores. Dentro del controlador predictivo como se muestra en la gráfica 4.6 este se ajusta a los valores establecidos por el set point para cada intervalo de tiempo respetando los valores caracterizados por el tipo de cultivo. En cuanto a la obtención de un modelo que funcione para los dos cultivos tomados en cuenta en este trabajo que fueron el tomate de riñón y frutillas se obtuvieron por ejemplo valores de temperatura óptimos para ambos cultivos como es el de 26°C de manera que ambos productos pudieran desarrollarse de mejor manera en el ambiente proporcionado por el controlador.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar los otros métodos de control predictivo para verificar si existe una mejora en el rendimiento del sistema o algún tipo de respuesta más rápida al evaluar los parámetros de la planta, haciéndole más eficiente y adecuado con respecto a cada caso.

En cuanto al servidor web es recomendable implementar una base de datos adicional a la existente que permita guardar valores de un período de tiempo y así graficar las diferentes variaciones del sistema para que sea posible observar las gráficas que han sido expuestas en este trabajo y no solo que estas sean visibles en la Raspberry.

Para tener una adecuada ventilación se recomienda mejorar el hardware de apertura y cierre de cortinas, además de ser posible implementar sensores de distancia los cuales informen al servidor el porcentaje de apertura y cierre de cortinas y ventanas, con lo cual mejoraría sustancialmente las condiciones del controlador predictivo mejorando así la ventilación.

Se recomienda que para tener un mejor control de la radiación se implemente un sistema automatizado de malla Zaran el cual pueda restringir o permitir el paso de luz con las radiaciones apropiadas de acuerdo a los criterios del controlador, ya que en el control predictivo actual no se puede contar con un manejo de la radiación, solo es posible monitorearlo.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Ángel Cobo, P. G. (2005). PHP y MySQL Tecnologías para el desarrollo de aplicaciones web. España.
- Benavides, V. C. (Diciembre de 2010). DESARROLLO DE UN MÓDULO PARA LA ENSEÑANZA DEL CONTROL PREDICTIVO BASADO EN EL MODELO CPBM. Quito, Pichincha.
- Ghoumari, M. Y. (2004). OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UN INVERNADERO MEDIANTE CONTROL PREDICTIVO NO LINEAL.
- Greif, T. C. (2014). Descubriendo Meteor.
- Julio C. Zambrano, Ana I. Gonzalez. (2013). *Implementación de un algoritmo de control predictivo en espacio de estados sobre una plataforma de simulación desarrollada en Matlab*. Quito: Ingenious.
- Kouro, S. (2001). *Sensores de humedad*.
- Marruedo, D. L. (2002). *Control Predictivo de sistemas no lineales con restricciones*. Sevilla.
- Marruedo, D. L. (2002). *Control predictivo de sistemas no lineales con restricciones: estabilidad y robustez*. Sevilla.
- Node.js. (2017). *Node.js Foundation*. Obtenido de <https://nodejs.org/es/>
- Ojeda, L. (s.f.). *Arduino*. Santiago. Obtenido de <http://arduino.cl/>
- Paramio, C. (10 de Mayo de 2011). Una Introducción a Mongo DB.
- Suehring, S. (2002). *MySQL Bible*. New York, United States.
- Wallace, M. R. (07 de Diciembre de 2013). *With Raspberry Pi*. Sebastopol, Gravenstein Highway North, United States of America.
- Yassine, M. (2010). *Optimización de la producción de un invernadero mediante control Predictivo lineal*. Madrid.
- Zambrano C. Julio, Gonzales I. Ana. (2013). Implementación de un algoritmo de control predictivo en un espacio de estados sobre una plataforma de simulación desarrollada en Matlab. *Ingenious*, 5-14.

## ANEXOS

### DATOS TÉCNICOS DE RASPBERRY PI 3

#### HARDWARE

- Low cost
- Low power
- High availability
- High reliability
  - Tested over millions of Raspberry Pis Produced to date
  - Module IO pins have 35u hard gold plating

#### PERIFÉRICOS

- 48x GPIO
- 2x I2C
- 2x SPI
- 2x UART
- 2x SD/SDIO
- 1x HDMI 1.3a
- 1x USB2 HOST/OTG
- 1x DPI (Parallel RGB Display)
- 1x NAND interface (SMI)
- 1x 4-lane CSI Camera Interface (up to 1Gbps per lane)
- 1x 2-lane CSI Camera Interface (up to 1Gbps per lane)
- 1x 4-lane DSI Display Interface (up to 1Gbps per lane)
- 1x 2-lane DSI Display Interface (up to 1Gbps per lane)

#### SOFTWARE

- ARMv6 (CM1) or ARMv7 (CM3, CM3L) Instruction Set
- Mature and stable Linux software stack
  - Latest Linux Kernel support

- Many drivers upstreamed
- Stable and well supported userland
- Full availability of GPU functions using standard APIs

### **DATOS TÉCNICOS ESP 8266**

- 802.11 b/g/n
- Integrated low power 32-bit MCU
- Integrated 10-bit ADC
- Integrated TCP/IP protocol stack
- Integrated TR switch, balun, LNA, power amplifier and matching network
- Integrated PLL, regulators, and power management units
- Supports antenna diversity
- WiFi 2.4 GHz, support WPA/WPA2
- Support STA/AP/STA+AP operation modes
- Support Smart Link Function for both Android and iOS devices
- SDIO 2.0, (H) SPI, UART, I2C, I2S, IR Remote Control, PWM, GPIO
- STBC, 1x1 MIMO, 2x1 MIMO
- A-MPDU & A-MSDU aggregation & 0.4s guard interval
- Deep sleep power <10uA, Power down leakage current < 5uA
- Wake up and transmit packets in < 2ms
- Standby power consumption of < 1.0mW (DTIM3)
- +20 dBm output power in 802.11b mode
- Operating temperature range -40C ~ 125C
- FCC, CE, TELEC, WiFi Alliance, and SRRC certified

Categories	Items	Values
WiFi Parameters	Certificates	FCC/CE/TELEC/SRRC
	WiFi Protocols	802.11 b/g/n
	Frequency Range	2.4G-2.5G (2400M-2483.5M)
	Tx Power	802.11 b: +20 dBm
		802.11 g: +17 dBm
		802.11 n: +14 dBm
	Rx Sensitivity	802.11 b: -91 dbm (11 Mbps)
802.11 g: -75 dbm (54 Mbps)		
802.11 n: -72 dbm (MCS7)		
Types of Antenna	PCB Trace, External, IPEX Connector, Ceramic Chip	
Hardware Parameters	Peripheral Bus	UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/IR Remote Control
		GPIO/PWM
	Operating Voltage	3.0~3.6V
	Operating Current	Average value: 80mA
	Operating Temperature Range	-40°~125°
	Ambient Temperature Range	Normal temperature
	Package Size	5x5mm
External Interface	N/A	
Software Parameters	WiFi mode	station/softAP/SoftAP+station
	Security	WPA/WPA2
	Encryption	WEP/TKIP/AES
	Firmware Upgrade	UART Download / OTA (via network)
	Software Development	Supports Cloud Server Development / SDK for custom firmware development
	Network Protocols	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP