



Automatización y control de un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) mediante la construcción de un prototipo análogo a un área de producción farmacéutica utilizado para el desarrollo de habilidades educativas.

Jineth Melissa Herrera Molina

Código 11481723730

Harrison Yovany Moreno Jiménez

Código 11481727484

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

Año 2023

Automatización y control de un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) mediante la construcción de un prototipo análogo a un área de producción farmacéutica utilizado para el desarrollo de habilidades educativas.

Jineth Melissa Herrera Molina

Harrison Yovany Moreno Jiménez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecatrónico

Director:

Ing. Hugo Ferney Alba Díaz

Línea de Investigación:

Diseño y optimización

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

Año 2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
Automatización y control de un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado
(HVAC) mediante la construcción de un prototipo análogo a un área de producción
farmacéutica utilizado para el desarrollo de habilidades educativas, Cumple con los requisitos
para optar
Al título de Ingeniero Mecatrónico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá D.C., 09 de mayo del 2023.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros familiares que estuvieron siempre presentes apoyándonos en cada una de las etapas de este proceso.

Tabla de Contenido

1. Resumen.....	13
2. Abstract	14
3. Introducción	15
4. Planteamiento del problema.....	18
5. Objetivos	20
5.1 Objetivo general	20
5.2 Objetivos específicos	20
6. Justificación	21
7. Marco teórico	22
7.1 Procesos de acondicionamiento de aire	22
7.1.1 Aire seco y aire atmosférico	23
7.1.2 Humedad específica y relativa	24
7.1.3 Entalpia del aire.....	25
7.2 Teoría de control.....	25
7.2.1 Sistema de control lazo abierto	27
7.2.2 Sistema de control lazo cerrado.....	28
7.3 Control PID.....	29
7.3.1 Componente proporcional	30
7.3.2 Componente integral	30
7.3.3 Componente derivativo	30
7.3.4 Sintonía de Ziegler-Nichols	32
7.4 Instrumentación Industrial	33
7.5 Sistema de Control de HVAC	34
7.6 Partes de un sistema HVAC	34
7.7 Unidad manejadora de ingreso de aire	36
7.8 Unidad de extracción de aire y colectores de polvos.....	36
7.9 Ductos	37
7.10 Filtración de Aire.....	37
7.11 Microcontrolador ESP32 NodeMCU	38

8.	Metodología de la investigación	40
8.1	Recolección y análisis de información	41
8.2	Diseño	50
8.2.1	Elección de componentes	52
8.2.2	Características de los componentes	57
8.2.3	Tablas comparativas requerido vs suministrado	61
8.3	Ensamble	63
8.3.1	Herramientas y equipos utilizados en el proceso	63
8.3.2	Implementación del control PID	65
8.3.3	Diagrama lazo de control de temperatura	70
8.3.1	Diagrama lazo de control de humedad	71
8.3.2	Diagrama lazo de control de presión diferencial	71
8.3.3	Construcción del cuarto	72
8.3.4	Construcción de la unidad de suministro	74
8.3.5	Construcción de la unidad de extracción	75
8.3.6	Ensamble general	76
8.3.7	Construcción de las tarjetas electrónicas	77
8.4	Programación	86
8.5	Implementación	91
8.5.1	Grafica de variables	91
8.6	Puesta a punto	95
8.6.1	Primera falla: Alta temperatura	95
8.6.2	Segunda falla: Humedad fuera de rango	96
9.	Conclusiones	97
10.	Recomendaciones	100
11.	Bibliografía	101

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Procesos de acondicionamiento de aire. [9].....	22
Ilustración 2. Sistema de control de temperatura. [10]	27
Ilustración 3. Ejemplo lazo de control abierto. [12].....	28
Ilustración 4. Ejemplo lazo de control cerrado. [12].....	29
Ilustración 5. Ejemplo control PID. [15].....	29
Ilustración 6. Diagrama de bloques representación PID. [10]	31
Ilustración 7. Unidad manejadora de suministro.....	35
Ilustración 8. Distribución sistema HVAC. [20].....	36
Ilustración 9. Procesador ESP32 NodeMCU	39
Ilustración 10. Tabla de clases de salas y zonas limpias. [23]	42
Ilustración 11. Aplicaciones estándar de condiciones temperatura y humedad relativa. [26]	44
Ilustración 12. Vista 1 prototipo 3D.....	50
Ilustración 13. Vista 2 prototipo 3D.....	51
Ilustración 14. Vista UMA prototipo 3D.	51
Ilustración 15. Vista 3 prototipo 3D.....	52
Ilustración 16. Grafica de estabilización humedad/temperatura	67
Ilustración 17. Diagrama simulink.....	69
Ilustración 18. Grafica simulink.....	69
Ilustración 19. Grafica señal de referencia vs variable de proceso Simulink.....	69
Ilustración 20. Lazo de control de humedad.	70
Ilustración 21. Lazo de control de temperatura.	71
Ilustración 22. Lazo de control de humedad.	71
Ilustración 23. Corte y ensamble del cuarto.....	72
Ilustración 24. Ensamble cuarto módulo de polietileno reforzado.....	73
Ilustración 25. Cuarto en lámina de acero recubierto.....	73
Ilustración 26. Exterior y ductos unidad manejadora de enfriamiento y calefacción.	74
Ilustración 27. Ensamble unidad manejadora de enfriamiento y calefacción.	74
Ilustración 28. Montaje intercambiadores y motores-ventiladores.	75

Ilustración 29. Exterior y ductos unidad de extracción.....	75
Ilustración 30. Unidad de extracción.....	76
Ilustración 31. Ductería y ensamble general.	76
Ilustración 32. Banco de ensayos.	77
Ilustración 33. Ensamble tarjeta procesadora.....	78
Ilustración 34. Conexión tarjeta procesadora.....	78
Ilustración 35. Conexión tarjeta procesadora.....	79
Ilustración 36. Tarjeta principal final.....	79
Ilustración 37. Drivers de velocidad ventiladores.....	80
Ilustración 38. Ensamblaje tarjetas de presión.....	80
Ilustración 39. Ensamblaje tarjetas eléctricas.....	81
Ilustración 40. Tarjeta dimmer motor suministro.....	81
Ilustración 41. Sensor humedad-temperatura en cuarto.....	82
Ilustración 42. Sensor de presión en cuarto.....	82
Ilustración 43. Sensor presión ambiente.	83
Ilustración 44. Sensor de presión en la salida de la UMA suministro.....	83
Ilustración 45. Sensor de presión en la entrada de la UMA suministro.....	84
Ilustración 46. Sensor de presión en la salida de la UMA extracción.....	84
Ilustración 47. Sensor de presión en la entrada a de la UMA extracción.....	85
Ilustración 48. Pines conexión sensores.....	85
Ilustración 49. Programa principal.....	86
Ilustración 50. Configuración puertos de entrada.....	87
Ilustración 51. Configuración puertos de salida.....	87
Ilustración 52. Void sample data.....	88
Ilustración 53. Void manage PID.....	89
Ilustración 54. Void manage actuators.....	90
Ilustración 55. Lectura de variables en tiempo real.....	91
Ilustración 56. Gráfica1 temperatura y humedad.....	91
Ilustración 57. Gráfica2 temperatura y humedad.....	92
Ilustración 58. Gráfica3 temperatura y humedad.....	92

Ilustración 59. Datos con respecto al tiempo (humedad y temperatura) vs la señal de referencia.	93
Ilustración 60. Datos de graficación 1.....	93
Ilustración 61. Datos de graficación 2.....	94
Ilustración 62. Datos de graficación 3.....	94
Ilustración 63. Tabla de fallas.	95
Ilustración 64. Falla 1.....	95
Ilustración 65. Grafica alarma 1.....	96
Ilustración 66. Falla 2.....	96

Tabla de Tablas

Tabla 1. Sintonía de Ziegler y Nichols.....	33
Tabla 2. Selección material aislante.....	53
Tabla 3. Selección material estructural.	53
Tabla 4. Selección ventiladores.....	54
Tabla 5. Selección sensor temperatura-humedad.....	55
Tabla 6. Selección sensor presión diferencial.	56
Tabla 7. Selección microprocesador.	56
Tabla 8. Selección sistema de refrigeración.....	57
Tabla 9. Selección sistema de calentamiento.....	57
Tabla 10. Especificaciones del aislamiento.....	58
Tabla 11. Especificaciones ventiladores.	58
Tabla 12. Especificaciones sensor temperatura y humedad.....	59
Tabla 13. Especificaciones sensor de presión diferencial.	59
Tabla 14. Especificaciones celda peltier.	60
Tabla 15. Especificaciones intercambiador.....	60
Tabla 16. Especificaciones microprocesador.....	61
Tabla 17. Herramientas y equipos.....	65

Tabla de Ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de la conservación de la energía. [9]	23
Ecuación 2. Presión total. [9]	23
Ecuación 3. Humedad específica. [9]	24
Ecuación 4. Humedad relativa. [9]	24
Ecuación 5. Entalpía del aire por unidad de masa de aire seco. [9]	25
Ecuación 6. Ley de control continuo en el tiempo.	32
Ecuación 7. Función de transferencia de primer orden. [17]	33
Ecuación 8. Volumen del prototipo.....	42
Ecuación 9. Caudal del cuarto.....	42
Ecuación 10. Volumen específico.	44
Ecuación 11. Flujo másico.	45
Ecuación 12. Discretización de ecuación continua.	65
Ecuación 13. Descripción q_0	65
Ecuación 14. Descripción q_1	66
Ecuación 15. Descripción q_2	66
Ecuación 16. Control PID discreto. [27]	66
Ecuación 17. Función de transferencia de planta.	68
Ecuación 18. Ganancia proporcional.	70
Ecuación 19. Tiempo integral.	70
Ecuación 20. Tiempo derivativo.	70

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>HVAC</i>	Calefacción, ventilación y aire acondicionado
<i>INVIMA</i>	Instituto nacional de vigilancia de medicamentos y alimentos
<i>OMS</i>	Organización mundial de la salud
<i>UMA</i>	Unidad manejadora de aire
<i>CFM</i>	Pie cubico por minuto
<i>MP</i>	Micropartículas
<i>ISO</i>	Organización internacional de normalización
<i>RTD</i>	Detector de temperatura resistivo
<i>PID</i>	Control proporcional integral derivativo
<i>3D</i>	Tercera dimensión.

1. Resumen

Este documento detalla el proceso de diseño, desarrollo e implementación de un prototipo de sistema HVAC del área de una planta farmacéutica. En este proyecto se utilizaron instrumentos de medición y se controlaron las variables temperatura, humedad y presión diferencial a través de la programación del procesador CPU NoDE MCU ESP32 para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

Además, se realizaron diferentes pruebas y se simularon fallas de temperatura, humedad y presión diferencial, para evaluar el comportamiento del prototipo frente a situaciones reales de funcionamiento en el campo industrial. El prototipo se mantuvo dentro de los parámetros de las variables de humedad $25\% \pm 5\%$ y temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y

El cuarto fue diseñado con dimensiones de 30x30x30 cm en lámina galvanizada y material aislante, las unidades manejadoras se ensamblaron en el mismo material y selladas herméticamente, el equipo ejecuta la función de transferencia hallada con la curva de humedad y temperatura.

El prototipo se diseñó con la intención de ser utilizado como herramienta de formación educativa para estudiantes que se inicien en el campo laboral. Además, brinda una oportunidad para que los estudiantes adquieran conocimientos prácticos acerca de los sistemas HVAC y su funcionamiento, así como experiencia en el manejo de instrumentos de medición, diseño mecánico y programación de procesadores.

2. Abstract

This document details the process of design, development and implementation of a prototype HVAC system in the area of a pharmaceutical plant. In this project, measuring instruments were used and the variables temperature, humidity and differential pressure were controlled through the programming of the CPU NoDE MCU ESP32 processor to ensure the correct operation of the system.

In addition, different tests were carried out and temperature, humidity and differential pressure failures were simulated, to evaluate the behavior of the prototype against real operating situations in the industrial field. The prototype remained within the parameters of the humidity variables 25% +5% and temperature of 25 +5°C and

The room was designed with dimensions of 30x30x30 cm in galvanized sheet and insulating material, the handling units were assembled in the same material and hermetically sealed, the equipment executes the transfer function found with the humidity and temperature curve.

The prototype was designed with the intention of being used as an educational training tool for students who are starting out in the labor field. In addition, it provides an opportunity for students to gain practical knowledge about HVAC systems and their operation, as well as experience operating measuring instruments, mechanical design, and processor programming.

3. Introducción

La industria farmacéutica es uno de los sectores que necesita contar con estrictos controles de aire dentro del ambiente interior en las áreas productivas; es por esto, que los equipos de extracción, los ductos, los filtros, los difusores, entre otros, se deben seleccionar cuidadosamente basándose en elementos establecidos en la normatividad aplicable para hacer que los procesos sean correctos, los productos sean de buena calidad y el personal permanezca seguro.

En cuanto a los sistemas HVAC dentro de esta industria, estos se consideran igual de críticos que los sistemas de agua purificada y aire comprimido debido a que constantemente están en contacto directo con los productos. También, hay que mencionar que dichos sistemas HVAC no están exentos que sean monitoreados rigurosamente para poder cumplir con requisitos obligatorios al momento de desarrollar la validación del sistema. [1]

La Organización Mundial de la Salud (OMS) a lo largo del tiempo ha desarrollado una serie de referencias para cada uno de los órganos de control en los países miembros de éste ente internacional; dentro de estos escritos se encuentran unas observaciones específicas para los sistemas HVAC en la industria farmacéutica para garantizar el cumplimiento en los procedimientos de manufactura de medicamentos. Actualmente la entidad regulatoria en Colombia es el INVIMA quien desarrolla auditorías a las empresas farmacéuticas para corroborar el cumplimiento de los informes pronunciados por parte de la OMS.

En un país como Colombia ubicado en un área geográfica tropical donde están presentes diversos climas, la variación de temperatura y humedad representa un factor que aumenta el crecimiento de moho, microorganismos y la pérdida de propiedades físico-químicas del producto

manufacturado, por tal motivo se deben emplear nuevas tecnologías que puedan suministrar en áreas de dispensación, fabricación, envase y empaque un aire el cual se encuentre dentro de los rangos establecidos y brinde confort operativo.

Dicho procedimiento se logra por medio de unidades manejadoras (UMA), que suministran o extraen aire el cual fluye por una serie de filtros que eliminan partículas y brindan un porcentaje de limpieza, en donde sistemas de deshumidificación y refrigeración aportan o restan calor y/o humedad, dependiendo de la variable que se vaya a controlar. A esto se le suma una infraestructura mecánica, eléctrica y de automatización con la que se pueda controlar las variables referidas en tiempo real.

Por otro lado, a nivel nacional están los estándares de calidad en las industrias farmacéuticas que exigen el cumplimiento del informe establecido por el INVIMA. En el que se encuentran las normas con las que se garantizan las condiciones de infraestructura que se necesitan para poder asegurar la calidad de las zonas en las que se desarrollan los productos para el consumo final. Para lograr todo esto son importantes los sistemas HVAC cuya función es proporcionar las condiciones ambientales de presión diferencial, térmicas, de humedad, caudales y cambios de aire necesarios dentro de los espacios de manufactura, controlando variables y generando un entorno apto para el cumplimiento de las diferentes tareas que conlleva el proceso de fabricación de medicamentos.

Para presentar la formulación de la problemática donde se visualice el alcance, se debe tener en cuenta que todos los componentes del sistema como los motores, la unidad de tratamiento de aire y ductos estén ubicados en un piso técnico fuera de la planta para poder ejecutar el mantenimiento y dar cumplimiento a las condiciones operativas. [2]

La educación juega un papel fundamental al proveer a las personas los conocimientos, habilidades, y competencias necesarias para participar de manera efectiva en la sociedad y en la economía. Además, la educación puede impactar positivamente en distintas áreas de la vida diaria de las personas. Diversas investigaciones señalan que las personas con un buen nivel educativo tienen una esperanza de vida más larga, participan de manera más activa en la política y en la comunidad, cometen menos delitos y requieren menos asistencia social. [3]

Las instituciones de educación superior se enfrentan al desafío de formar egresados capaces de contribuir a resolver los problemas de nuestra realidad. Para lograrlo, es fundamental que revisen y mejoren continuamente sus prácticas, adecuándolas a las nuevas necesidades sociales. Una forma efectiva de responder a estas demandas es a través de la innovación, cuyo concepto, aunque diverso en alcance, exige siempre la creatividad para resolver problemas de manera renovada y superior. Un país que promueve y apoya la innovación tendrá una ventaja en cuanto a la capacidad para enfrentar los desafíos actuales y cambiantes en áreas como lo social, ambiental, salud, economía, productividad, entre otros. [4]

Los prototipos didácticos se componen de materiales audiovisuales de diverso tipo, software educativo y modelos tridimensionales adaptados a las capacidades individuales y a cualquier recurso adecuado para aplicar el proceso de enseñanza-aprendizaje de modo innovador. Estas herramientas fomentan el interés y comprensión de los contenidos educativos gracias a su carácter innovador y didáctico. [5]

4. Planteamiento del problema

Según Helmer [6], los medicamentos que durante su ruta de fabricación toman varias vías antes que lleguen al paciente cuentan con mayor riesgo de variaciones de temperatura, exposición a la humedad, la luz y el oxígeno. Es así como las compañías farmacéuticas deben contar con un sistema de registro de las condiciones de almacenamiento, dispensación, fabricación, envase y empaque a lo largo del proceso.

Existe un gran problema asociado con la medicación que se compromete a la exposición de temperaturas y humedades que vayan más allá de los parámetros que el fabricante haya determinado. La pérdida de eficacia puede producir muchos problemas que pueden comprometer la salud del paciente; esto se puede dar con algunos fármacos, por ejemplo, la epinefrina al exponerla a calentamientos y enfriamientos constantes, puede perder el 64% de su eficacia; es así que, si se utiliza en un paciente para tratar una reacción anafiláctica grave es posible que no sirva según lo previsto, provocando la muerte.

Otro riesgo de almacenar medicamentos por fuera del rango de temperatura y/o humedad recomendado por el fabricante es la pérdida financiera. Los fármacos que se almacenan en condiciones fuera del rango durante un espacio de tiempo prolongado se deben desechar. Ciertos medicamentos refrigerados pueden tener una fecha de caducidad corta y si se almacenan a temperatura ambiente la vida útil de estos se disminuye significativamente haciendo que exista el riesgo que caduquen antes que se consuman, lo que produce desperdicios y como se mencionó con antelación una mayor carga financiera para el consumidor o distribuidor. [6]

Los sistemas HVAC son equipos críticos, los cuales necesitan de personal calificado para su operación; la falta de conocimiento de los procesos en el área de la conservación de fármacos, puede afectar el funcionamiento de dichos dispositivos alterando las condiciones con las que son elaborados o envasados esos medicamentos; es por esta razón que se requiere llevar a cabo capacitaciones con las que se generen las habilidades necesarias para el manejo de las unidades.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Diseñar y desarrollar un prototipo de un sistema HVAC automático para la formación de habilidades educativas relacionadas al ámbito laboral donde se pueda llevar a cabo la lectura y el control de las variables de medición.

5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar y diseñar el sistema HVAC, especificando los valores requeridos para cada variable en el proceso y la ubicación determinada de los componentes.
- Desarrollar el diseño mecánico en 3D del prototipo a través del programa Inventor y generar los planos mecánicos de las piezas que se deberán elaborar.
- Ensamblar las partes mecánicas del prototipo y desarrollar la conexión eléctrica de entradas y salidas del sistema con el procesador.
- Diseñar los lazos de control de las variables en el prototipo con un set point de $25^{\circ}\text{C} \pm 5$ de temperatura, $25\% \pm 5$ humedad y 5Pa mínimo de presión diferencial).
- Realizar la programación del microcontrolador para el procesamiento de las señales de temperatura, humedad, presión diferencial.
- Simular en el prototipo las 3 primeras fallas (alta temperatura, presión diferencial por fuera de rango – filtros rotos) que puede presentar el sistema y evaluar el desempeño del prototipo verificando el control constante de variables.

6. Justificación

Un sistema HVAC eficaz se ha convertido en un requisito primordial con el que se pueda garantizar condiciones adecuadas en los procesos farmacéuticos. Como, por ejemplo, el almacenamiento de insumos y agentes activos. En la medida que la industria del sector farmacéutico está creciendo, la necesidad de generar aire altamente puro para los procesos y salas limpias estará causando el incremento del mercado de los sistemas HVAC. [7]

Las condiciones ambientales en las que se elaboran los productos farmacéuticos deben permanecer en rangos de temperatura, humedad y pureza basados en las diferentes normatividades y estándares a nivel nacional e internacional con los que se pueda asegurar que haya un control adecuado del proceso. Es por esto que el sistema de ventilación y aire acondicionado HVAC es necesario en la industria farmacéutica para garantizar la integridad del proceso y el confort del personal en zonas de trabajo. [8]

En cuanto a la parte pedagógica, el desarrollo de este prototipo permite conectar el ámbito educativo con el laboral presentando uno de tantos sistemas que benefician los procesos productivos dentro de la industria farmacéutica colombiana y genero un vínculo entre la parte teórica y la parte práctica con el que los educandos de ingeniería puedan fortalecer las competencias a través de métodos didácticos que permitan detectar y corregir fallas por medio de un monitoreo de las variables.

7. Marco teórico

7.1 Procesos de acondicionamiento de aire

A fin de alcanzar los niveles de humedad y temperatura ideales en una vivienda o construcción industrial, se recurre a procedimientos específicos conocidos como "acondicionamiento del aire". Dentro de estos procesos se incluyen el calentamiento de aire para elevar la temperatura, enfriamiento para reducirla, la agregación o eliminación de humedad mediante la humidificación y deshumidificación respectivamente. En ocasiones, es necesario combinar dos o más de estos procesos con el fin de obtener el nivel deseado de temperatura y humedad en el aire. [9]

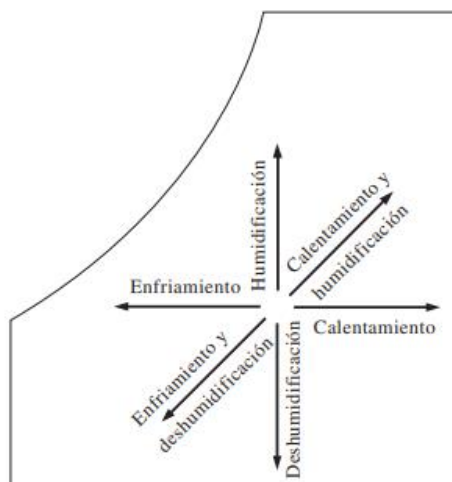


Ilustración 1. Procesos de acondicionamiento de aire. [9]

Un proceso de enfriamiento a humedad específica constante se asemeja al proceso de calentamiento, excepto que la temperatura de bulbo seco disminuye y la humedad relativa

aumenta durante este proceso. Las ecuaciones de la conservación de la masa para un proceso de calentamiento o enfriamiento que no incluye humidificación o deshumidificación, se reducen a $\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$ para aire seco y $\omega_1 = \omega_2$ para el agua [9]. En ausencia de trabajo del ventilador, la ecuación de conservación de la energía será:

$$\dot{Q}_{a1} = \dot{m}_a(h_2 - h_1) \text{ o } q = h_2 - h_1$$

Ecuación 1. Ecuación de la conservación de la energía. [9]

\dot{m} = flujo masico.

h = entalpia del aire.

7.1.1 Aire seco y aire atmosférico

La atmósfera contiene una mezcla de gases, incluyendo nitrógeno, oxígeno y otros gases. Normalmente, el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o humedad) y se conoce como aire atmosférico. En cambio, el aire que no contiene vapor de agua se denomina aire seco. Es común tratar al aire como una mezcla de aire seco y vapor de agua, A pesar de que la presencia de vapor de agua en el aire es relativamente pequeña, su comportamiento obedece a la ley general de los gases ideales $Pv=RT$. En el caso de la mezcla de aire seco y vapor de agua, la presión total se compone de la suma de las presiones parciales, siendo una correspondiente al aire seco P_a y otra al vapor de agua P_v : [9]

$$P = P_a + P_v$$

Ecuación 2. Presión total. [9]

P = presión total.

$P_a =$ presión parcial de aire seco.

$P_v =$ presión vapor de agua.

7.1.2 Humedad específica y relativa

Existen diversos métodos para determinar la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. Una manera lógica es medir directamente la masa de vapor de agua en una unidad de masa de aire seco, lo que se conoce como humedad absoluta o específica y se representa mediante el símbolo ω . [9]

$$\omega = \frac{0.622 \cdot P_v}{P - P_v}$$

Ecuación 3. Humedad específica. [9]

$\omega =$ humedad específica.

$P =$ presión total.

$P_v =$ presión vapor de agua.

El nivel de humedad presente en el aire tiene un impacto significativo en las condiciones de confort en un espacio determinado. No obstante, el nivel de confort depende más de la cantidad de humedad específica del aire (m_v) en relación con la cantidad de humedad máxima que el aire puede contener a la misma temperatura (m_g). La relación entre estas dos cantidades se conoce como humedad relativa y se representa mediante el símbolo ϕ . [9]

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g}$$

Ecuación 4. Humedad relativa. [9]

ϕ = *humedad relativa.*

m_v = *cantidad de humedad que contiene el aire.*

m_g = *cantidad maxima de humedad que el aire puede contener.*

P_v = *presión vapor de agua.*

P_g = *presión de saturacion de agua.*

7.1.3 Entalpia del aire

El aire en la atmósfera es una mezcla de aire seco y vapor de agua, lo que implica que la entalpía del aire debe expresarse en términos de las entalpías del aire seco y del vapor de agua. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, la cantidad de aire seco en la mezcla aire-vapor de agua permanece constante, mientras que la cantidad de vapor de agua varía. Por esta razón, la entalpía del aire atmosférico se representa por unidad de masa del aire seco. [9]

$$h = C.T + \omega h_g$$

Ecuación 5. Entalpia del aire por unidad de masa de aire seco. [9]

h = *Entalpia del aire.*

h_g = *Entalpia de vapor de agua saturado.*

C = *calor especifico.*

ω = *humedad especifica.*

7.2 Teoría de control

Aström [10], define el control como el uso de algoritmos y retroalimentación en sistemas de ingeniería. Por lo tanto, en control se presentan ejemplos como bucles de retroalimentación en amplificadores electrónicos y controladores, que incluyen el uso de la información de forma analógica y digital.

Murray [10], explica que el controlador moderno detecta el funcionamiento de un sistema, luego es comparado con respecto al comportamiento requerido, posteriormente se calculan las acciones correctivas a realizar y finalmente se activan las modificaciones necesarias para obtener el cambio deseado.

La ingeniería de control se basa y comparte herramientas de la física (dinámica y modelado), la informática (información y software) y la investigación de operaciones (optimización, teoría de la probabilidad y teoría de juegos). [10]

En la *Ilustración 2* se representa un sistema de control de temperatura en un horno eléctrico, donde se pueden evidenciar el controlador, el sensor, el amplificador y el actuador que intervienen dentro del proceso.

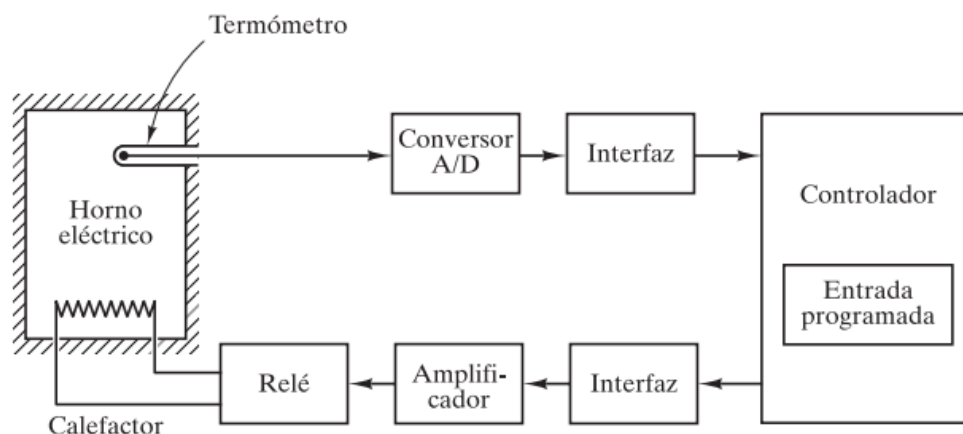


Ilustración 2. Sistema de control de temperatura. [10]

7.2.1 Sistema de control lazo abierto

Los sistemas de control de lazo abierto son caracterizados porque no se realiza la comparación de la salida con respecto a la entrada e igualmente tampoco el sistema es retroalimentado. Los tipos de control de lazo abierto no presentan altas perturbaciones externas o internas del sistema y son usados si se conoce la relación entre la entrada y la salida. [11] (Universidad Tecnológica de Pereira, 2011).

En la *Ilustración 3* se representa un ejemplo de lazo de control abierto, donde una lavadora ejecuta el enjuague de la ropa en ciclo repetitivo y no cambia por una señal de retroalimentación, si no únicamente se conocen las señales de entrada/salida, y bajo estas condiciones fue realizada su programación.

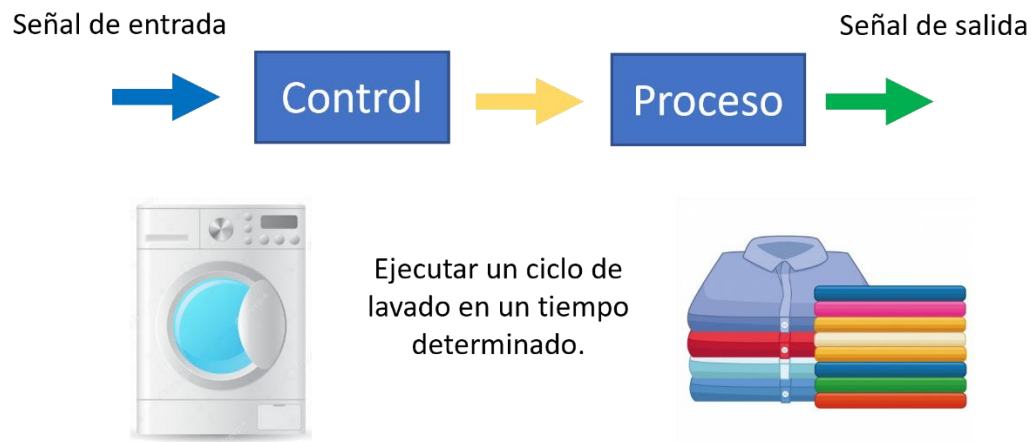


Ilustración 3. Ejemplo lazo de control abierto. [12]

7.2.2 Sistema de control lazo cerrado

Los lazos de control cerrado corrigen las desviaciones que presenta la salida con respecto a la entrada de referencia, por este motivo la retroalimentación es fundamental en estos sistemas, de esta manera, son relativamente estables a perturbaciones externas y alteraciones internas de los parámetros. [13]

La retroalimentación se obtiene mediante sensores que están enviando información y resultados actuales de la salida al elemento de comparación del sistema. Además, con el objetivo de realizar las correcciones de toda desviación de manera automática.

En la *Ilustración 4* se presenta un ejemplo de lazo de control cerrado, donde en una caldera se establece un *set point* de temperatura deseada, pasa por un control y ejecuta un actuador (válvula) en el sistema para obtener un resultado, finalmente la temperatura de salida es verificada por un sensor (operario) para luego ser comparada respecto a la señal de entrada.

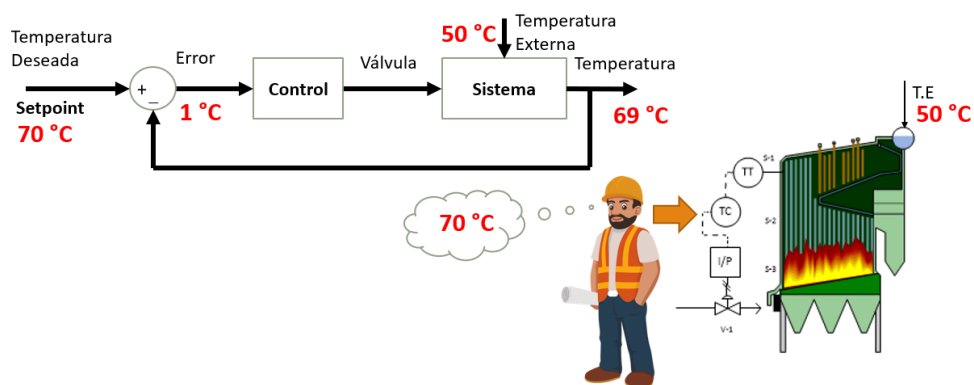


Ilustración 4. Ejemplo lazo de control cerrado. [12]

7.3 Control PID

Es utilizado para controlar diferentes variables de proceso tales como: temperatura, presión, flujo, entre otras. Empleado por industrias con aplicaciones de tratamientos térmicos, hornos, control de presiones e igualmente en el sector científico que se requiere una alta precisión y confiabilidad [14]. Las tres componentes de un control PID son la parte proporcional, integral y derivativa.

En la *Ilustración 5* se puede observar un control PID de temperatura por resistencias en la habitación de una casa, el cual cuenta con sensor de temperatura para medición continua del sistema.

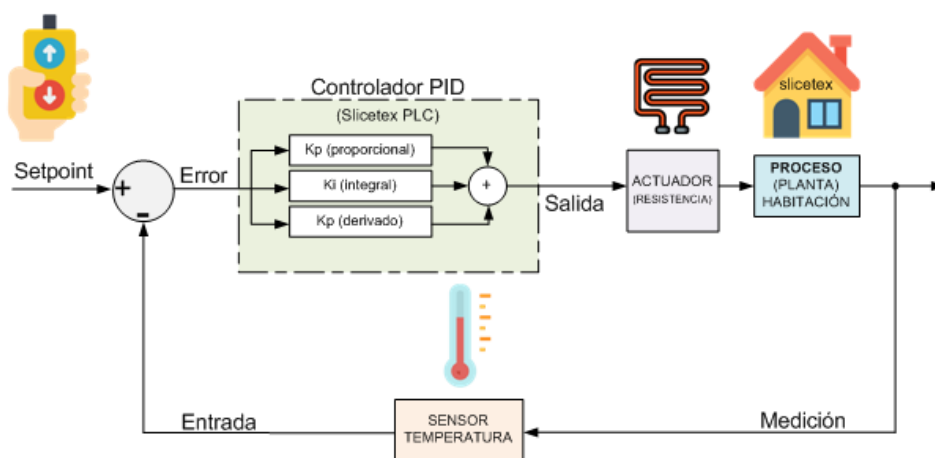


Ilustración 5. Ejemplo control PID. [15]

7.3.1 Componente proporcional

Este componente depende únicamente de la diferencia entre el punto de referencia y la variable del proceso. Esta diferencia es conocida como error.

La ganancia proporcional (**Kp**) determina la relación entre la respuesta de salida y la señal de error. Por ejemplo, si un error tiene una magnitud de 10, una ganancia proporcional de 5 produciría una respuesta proporcional de 50. Se debe tener en cuenta que, si la ganancia proporcional es demasiado grande la variable del proceso comenzará a oscilar. Es decir, si **Kp** se aumenta aún más, las oscilaciones serán mayores y el sistema puede volverse inestable. [16]

7.3.2 Componente integral

Este componente se caracteriza porque suma el término de error en el transcurso del tiempo. Incluso si el término de error es pequeño el componente integral aumentará lentamente.

La respuesta integral estará aumentando continuamente con el tiempo a menos que el error sea cero, por lo que el efecto es llevar el error de estado estable a cero. Este error de estado estable se refiere a la diferencia final entre la variable del proceso y el punto de referencia. [16]

7.3.3 Componente derivativo

La respuesta derivativa es proporcional a la tasa de cambio de la variable del proceso. Es decir, puede hacer que la salida disminuya si la variable del proceso aumenta rápidamente.

Aumentar el parámetro de tiempo derivado (T_d) hará que el sistema de control reaccione con más fuerza a los cambios en el término de error y aumentará la velocidad de respuesta del sistema

de control en general. Si la señal de retroalimentación del elemento o sensor es ruidosa o si el ciclo de control es demasiado lento, la respuesta derivada puede hacer que el sistema de control sea demasiado inestable. [16]

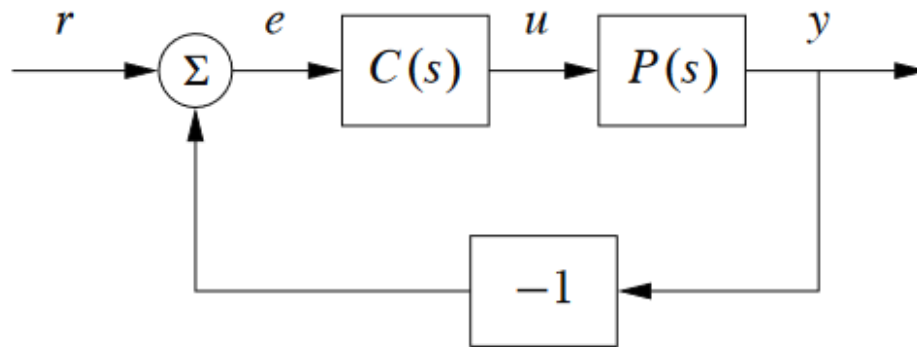


Ilustración 6. Diagrama de bloques representación PID. [10]

Donde:

***P** = Proceso.*

***C** = Controlador.*

***r** = Señal de referencia (Set point).*

***e** = Error del sistema.*

***y** = Salida.*

***u** = Ley de control.*

De acuerdo a Murray [10], la acción de control se compone de tres elementos: la retroalimentación proporcional, el término integral y la acción derivativa. Donde los parámetros del controlador son la ganancia proporcional k_p , la ganancia integral k_i y la ganancia derivada

k_d . Igualmente, las constantes de tiempo t_i y t_d , denominadas tiempo integral (constante) y tiempo derivativo (constante), se utilizan a veces en lugar de las ganancias integral y derivativa.

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt + k_p t_d \frac{de(t)}{dt}$$

Ecuación 6. Ley de control continuo en el tiempo.

Donde:

$k_p e(t)$ = Ganancia proporcional multiplica el error.

$\frac{k_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt$ = Ganancia integral multiplica integral del error.

$k_p t_d \frac{de(t)}{dt}$ = Ganancia derivativa multiplica derivada del error.

7.3.4 Sintonía de Ziegler-Nichols

Ogata [17] menciona que se pueden determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d de los controladores PID o la sintonía de los mismos, basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Ziegler y Nichols propusieron reglas para este propósito, donde se pueden llevar a cabo experimentos en la planta. [17]

A partir de la regla de sintonía de Ziegler-Nichols establecida en base a la respuesta de escalón de la planta, se obtiene los valores indicados en la siguiente tabla para un primer método.

Controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{\tau}{K\theta}$	—	—
PI	$\frac{0.9\tau}{K\theta}$	3.33 θ	—
PID	$\frac{1.2\tau}{K\theta}$	2 θ	0.5 θ

Tabla 1. Sintonía de Ziegler y Nichols.

De esta manera se obtiene la función de transferencia de primer orden con retardo, como lo indica la siguiente formula:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{ke^{-Ls}}{T_s + 1}$$

Ecuación 7. Función de transferencia de primer orden. [17]

7.4 Instrumentación Industrial

La instrumentación industrial se puede definir como la ciencia de la medición y control de los sistemas automatizados. La instrumentación se puede observar en sistemas de control de motores, diagramas de P&ID de maquinaria, fabricación y procesos de productos farmacéuticos, centrales eléctricas, petróleo y gas, refinerías, etc. Además, de ser de gran importancia en la investigación tecnológica, la industria y la vida cotidiana. [18]

7.5 Sistema de Control de HVAC

Un sistema de control de HVAC es un mecanismo computarizado que se utiliza para poder ajustar los componentes de calefacción, aire acondicionado y ventilación. Este se puede controlar manualmente o automáticamente. El sistema de control HVAC se puede utilizar para ajustar la temperatura, humedad, presión diferencial y demás configuraciones en estas unidades.

La calefacción, la ventilación y el aire acondicionado (HVAC) tienen un valor de gran importancia para garantizar la fabricación de productos farmacéuticos de calidad. Un sistema HVAC bien diseñado también proporciona condiciones cómodas para los operadores.

El diseño, operación y mantenimiento de un sistema de HVAC crítico para el sector farmacéutico es un reto constante, ya que requiere un monitoreo y validación continua para mantener las actividades que se llevan a cabo en el área, y no tener afectaciones dentro de la programación de órdenes de producción y demanda de procesos.

7.6 Partes de un sistema HVAC

A continuación, se describen las partes que componen un sistema HVAC:

- Unidad manejadora de suministro.
- Unidad manejadora de extracción.
- Ductos, canales por donde pasa el aire.
- Elementos eléctricos e instrumentación. [19]

En la *Ilustración 7* se observa las partes de una unidad manejadora de suministro de aire, tales como:

- Motor ventilador (A).
- Sección de calentamiento (B).
- Sección de enfriamiento (C).

- Sección de filtración (D)
- Ductos de suministro de aire (E).

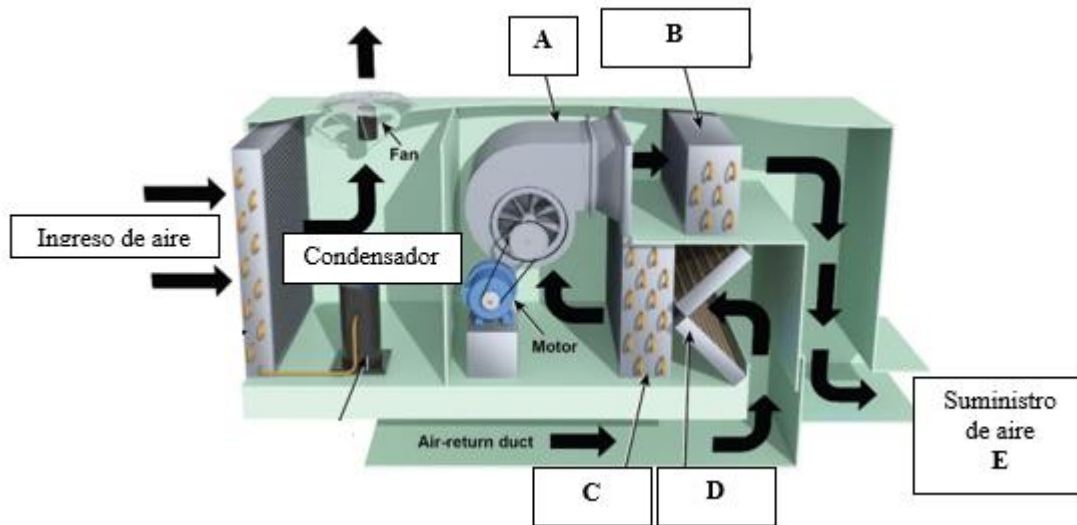


Ilustración 7. Unidad manejadora de suministro.

En la *Ilustración 8* se representa un ejemplo de distribución de ductos y unidades manejadoras, por lo general la UMA de suministro quedan ubicadas en la parte superior de las estructuras como se puede observar.

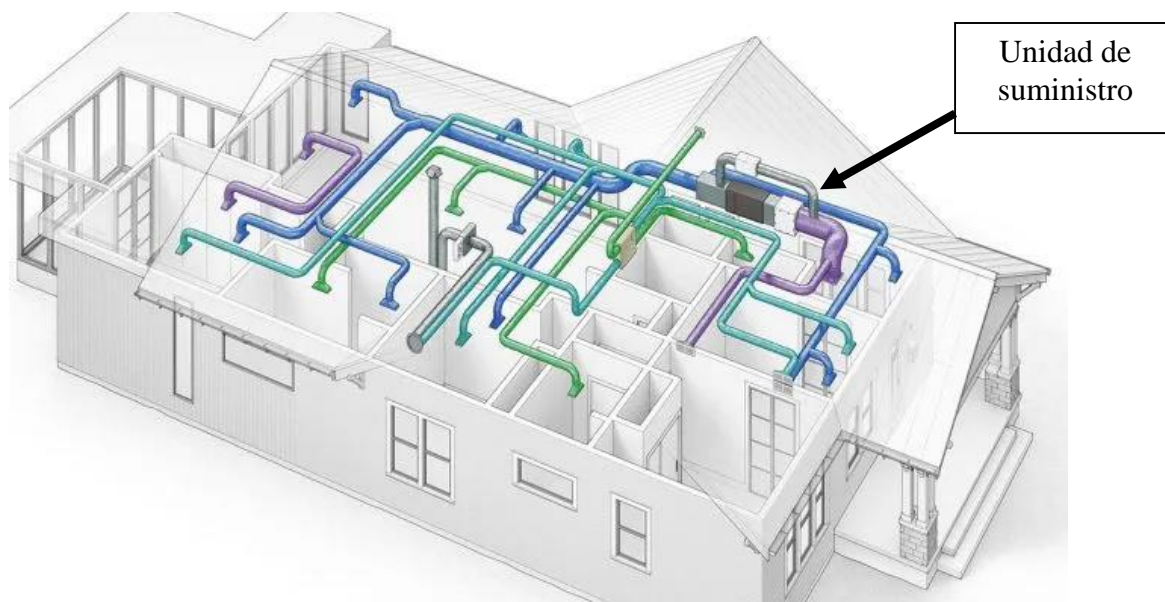


Ilustración 8. Distribución sistema HVAC. [20]

7.7 Unidad manejadora de ingreso de aire

La construcción de las unidades debe ser instaladas con perfiles de aluminio, paneles o láminas de acero galvanizado, aluminio o acero inoxidable. Los módulos internamente deben ser completamente lisas para facilitar los trabajos de limpieza y mantenimiento, prevenir el crecimiento microbiológico en estas zonas. Las uniones, paneles, ventanas y puertas deben quedar completamente herméticos. Los filtros que complementan la unidad deben llevar manómetros o indicadores de presión diferencial que indiquen el estado de cada filtro en el proceso. [1]

7.8 Unidad de extracción de aire y colectores de polvos

Las unidades de extracción son fabricadas de manera similar a las unidades de suministro de aire, con la diferencia que cuentan es con un ventilador centrífugo de extracción y filtros ubicados antes del mismo para evitar la incrustación de medicamentos en el motor o en el ventilador.

Los colectores de polvo son instalados con el objetivo de retener y aspirar el polvo que se pueda generar durante la fabricación y producción del medicamento, igualmente debe cumplir con las características de un equipo de grado farmacéutico. [1]

7.9 Ductos

Los conductos de retorno, inyección y extracción son generalmente fabricados con lámina galvanizada de un calibre apropiado para las dimensiones del conducto, a menos que se especifique un material diferente para sistemas específicos. Los únicos conductos que se construyen de acero inoxidable son aquellos que están expuestos dentro de las áreas de fabricación.

Para evitar el crecimiento de hongos, levaduras o bacterias, es importante aplicar un sello resistente a las condiciones ambientales en todas las uniones de los conductos. También es necesario realizar pruebas de hermeticidad una vez instalados los conductos para garantizar que haya una mínima fuga permitida, de acuerdo con la presión de diseño. [1]

7.10 Filtración de Aire

Una característica de los sistemas HVAC dentro de la industria farmacéutica es el filtrado, tanto en el aire que ingresa o suministra a los cuartos como las extracciones y colección de polvos. Como se mencionaba anteriormente o se indica en la *Ilustración 7* las unidades de suministro cuentan con una sección de filtrado, que es de suma importancia, ya que por medio de esta técnica retiene el material particulado contaminante del aire antes de ingresar al cuarto de producción farmacéutica.

Este sistema se utiliza ampliamente tanto en la industria farmacéutica, como en áreas alimenticias, automotriz, cosmética, entre otras, para poder controlar el ingreso y ventilación de MP y cumplir con los requisitos de normas vigentes en inocuidad. [21]

7.11 Microcontrolador ESP32 NodeMCU

Es un dispositivo programable de bajo costo y alto rendimiento diseñado para aplicaciones de IoT y proyectos de electrónica. Este microcontrolador cuenta con dos núcleos de procesamiento de 32 bits, una amplia variedad de interfaces de comunicación, conectividad WiFi y Bluetooth, lo que lo hace ideal para proyectos que requieren conectividad inalámbrica y capacidad de procesamiento.

El ESP32 NodeMCU tiene un tamaño pequeño y un bajo consumo de energía, lo que lo hace adecuado para aplicaciones portátiles y de bajo consumo. Además, cuenta con una memoria flash integrada de 4 MB, 520 KB de RAM y un reloj interno de alta precisión, utilizado en aplicaciones que requieren almacenamiento de datos y precisión en la medición del tiempo.

Entre los principales usos se encuentran el control de dispositivos IoT, la creación de redes de sensores inalámbricos, sistemas de automatización del hogar, entre otros. También se utiliza en proyectos de robótica, sistemas de control de acceso y seguridad, y en proyectos de domótica. Además, cuenta con un conector micro USB para programación y alimentación, y un conector para antena WiFi. [22]



Ilustración 9. Procesador ESP32 NodeMCU

8. Metodología de la investigación

Para estructurar la metodología, se definen seis etapas con las cuales se da desarrollo al proyecto estas son: recolección de información, análisis de información, diseño, ensamble, programación, implementación y puesta a punto.

En donde se desarrollaron los seis objetivos mencionados anteriormente y se plantea de la siguiente manera:

Etapa de recolección y análisis de información. Se reúne toda la información relacionada al proyecto realizado, donde indique los requerimientos y pautas necesarias para la construcción del prototipo.

Con la información encontrada se inicia a desarrollar las fases del proyecto y estudiar las investigaciones obtenidas, como la selección de instrumentación, elección de material de construcción, métodos de programación e implementación en el prototipo.

Etapa de diseño. En esta se realiza la caracterización del sistema HVAC, se definen mediante cálculos matemáticos la necesidad del prototipo e identifica cada uno de los componentes necesarios de acuerdo a las variables establecidas. Se diseñan los planos mecánicos, eléctricos, electrónicos y se evalúa la utilidad de cada una de las piezas.

Etapa de ensamble. Se realiza el ensamble del prototipo de acuerdo a las especificaciones definidas tanto para la parte mecánica, como la eléctrica.

Etapa de programación, Se desarrolla el programa con el que se procesa y controla la información del prototipo, en este programa se establece el método de visualización y se configura la *dashboard* con la que se monitorea y analiza dicha información.

Etapa de implementación, Se establece comunicación entre el prototipo y la *dashboard* en la cual se visualiza el estado de cada variable en tiempo real y permita extraer datos con respecto al tiempo.

Etapa de puesta a punto, Se realizan pruebas y se simulan fallas, con las que se evaluó los resultados para hacer las respectivas correcciones y mejorar el desempeño del prototipo.

8.1 Recolección y análisis de información

En base a la información obtenida de las investigaciones relacionadas acerca de la construcción de sistemas HVAC y cuartos farmacéuticos, se logró recolectar información importante y útil para el momento de realizar la instalación de todo el sistema, de esta manera, se alcanzó a tener un estudio inicial para la estructuración y ejecución del prototipo propuesto.

Para diseñar un sistema HVAC, para áreas limpias se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

A. Aplicación o tipo de industria al que va dirigido.

La industria en la que se implementó este sistema es la farmacéutica y su aplicación varía de acuerdo al proceso que se desee realizar: almacenamiento, fabricación, envase y empaque.

Las áreas limpias para la manufacturación de productos farmacéuticos son clasificadas de acuerdo a la limpieza del aire con tal de minimizar el riesgo de contaminación del producto o material.

El estándar ISO 14644-1 “Salas blancas y entornos controlados asociados”, define la clasificación de las áreas limpias de acuerdo a la concentración de partículas en el aire.

Clase	Máximo de partículas /m ³					
	>=0.1 μm	>=0.2 μm	>=0.3 μm	>=0.5 μm	>=1 μm	>=5 μm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1,000	237	102	35	8	
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO 7				352,000	83,200	2,930
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300

Ilustración 10. Tabla de clases de salas y zonas limpias. [23]

Donde se definen las clases de áreas limpias que son utilizadas a nivel industrial para múltiples propósitos, en este caso se usa la NORMA ISO clase 8 o grado D, indica que debe tener recuento de 3.520.000 partículas $\geq 0,5 \mu/m^3$ y un rango de cambios de aire por hora de 15 a 25, lo cual es determinado con respecto al volumen del prototipo. Las dimensiones del prototipo son 0,3 m de largo x 0,3 m de ancho x 0,3 m de alto.

$$v = 0.3 \times 0.3 \times 0.3 = 0.027 \text{ m}^3$$

Ecuación 8. Volumen del prototipo.

$$Q = \frac{v \times \# \text{ de cambio de aires}}{t}$$

Ecuación 9. Caudal del cuarto.

$$Q = \frac{0,027m^3 \times 20}{60 \text{ min}}$$

$$Q = 0,009 \frac{m^3}{\text{min}}$$

$$Q = 0,318 \text{ cfm}$$

donde: Q = caudal; v = volumen; t = tiempo

En el informe 45 [24], sugieren que los cuartos tengan un total de 15 a 25 cambios hora de aire. Por tal motivo se emplea en el prototipo un valor intermedio de 20 cambios hora, donde debe tener un caudal total de 0,318 cfm, el cual se divide en 0,159 cfm de suministro y 0,159 cfm de extracción, teniendo en cuenta la ubicación de las rejillas, distribución de la ductería y resistencia de los filtros al momento de seleccionar la unidad.

El estándar ISO 14644-1 y la resolución 1160 de 2016 establecen requisitos de presión diferencial mínima de 5 pascales (0.02 pulgadas de columna de agua) para las diferentes clases de aire en las áreas limpias con respecto a las áreas adyacentes. En un área limpia la presión diferencial controla el flujo de aire y mantiene la contaminación en niveles admisibles. La presión positiva en un área limpia evita que el aire contaminado ingrese desde áreas cercanas de menor limpieza y la presión negativa ayuda a que las partículas que se generan dentro del área no salgan de esta. [25]

B. Identificar las condiciones de temperatura y humedad relativa.

En la industria farmacéutica las variables de humedad relativa y temperatura varían según el proceso que se vaya a desarrollar. En la *Ilustración 11* se indican algunos procesos donde se especifican las condiciones de estas variables.

Aplicación	Condiciones	
	T (°F)	HR (%)
Farmacéutica		
Empaque de penicilina	80	5-15
Almacenamiento de cápsulas	75	35-40
Jarabes para la tos	80	40
Gotas para la tos	70	30
Efervescentes	90	15

Ilustración 11. Aplicaciones estándar de condiciones temperatura y humedad relativa. [26]

En base a la información recolectada el prototipo trabajara con valores de temperatura de 25°C y de humedad relativa 25%.

Para llegar a estos valores se realizó una investigación con la cual se encontró las condiciones ambientales promedio de la ciudad de Bogotá y se obtuvieron los siguientes datos con los cuales se calcula la tasa de transferencia de calor que se tiene que realizar en la sección de calentamiento para alcanzar la condición de humedad mínima del prototipo la cual es 20% de humedad relativa,

$$P = 73,460 \text{ kPa}; T_1 = 20^\circ\text{C}; T_2 = 45^\circ\text{C}; \phi = 80\%; \dot{v}_1 = 0,00045 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$R_a = 0,287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}; C_p = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$P_{\text{sat a } 20^\circ\text{C}} = 2,3392 \text{ kPa}; P_{\text{sat a } 45^\circ\text{C}} = 9,5953 \text{ kPa}$$

$$h_{g1} = 2537,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; h_{g2} = 2582,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Ecuaciones,

$$V = \frac{R \cdot T}{P_a}$$

Ecuación 10. Volumen específico.

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{v}}{V}$$

Ecuación 11. Flujo másico.

Desarrollando las ecuaciones se obtiene:

$$P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = \phi P_{sat \text{ a } 20^\circ C} = (0,8)(2,3392 \text{ kPa}) = 1,871 \text{ kPa}$$

Despejando la Ecuación 2. Presión total.

$$P_{a1} = P_1 - P_{v1} = (73,460 \text{ kPa} - 1,871 \text{ kPa}) = 71,589 \text{ kPa}$$

Con la Ecuación 10 se halla el volumen específico:

$$V_1 = \frac{R_a T_1}{P_{a1}} = \frac{(0,287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}})(293 \text{ K})}{71,589 \text{ kPa}} = 1,175 \frac{\text{m}^3}{\text{kg de aire seco}}$$

Se calculó la humedad específica con la Ecuación 3:

$$\omega_1 = \frac{(0,622)(1,871 \text{ kPa})}{(73,460 - 1,871) \text{ kPa}} = 0,016 \frac{H_2O}{\text{kg de aire seco}}$$

Con la Ecuación 5 se encontraron las entalpias del aire de acuerdo a la temperatura:

$$\begin{aligned} h_1 &= C_p T_1 + w_1 h_{g1} \\ &= \left(1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right)(20^\circ\text{C}) + (0,016)(2537,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) \\ &= 60,698 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_2 &= C_p T_2 + w_2 h_{g2} \\
 &= \left(1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right) (45^\circ\text{C}) + (0,016)(2582,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) \\
 &= 66,443 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

Se calcula el flujo másico reemplazando la Ecuación 11:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{v}_1}{V_1} = \frac{0,00045 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{1,175 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,000383 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Se halla la tasa de transferencia de calor al aire en la sección de calentamiento reemplazando la Ecuación 1 de la conservación de la energía.

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{a1} &= \dot{m}_a (h_2 - h_1) \\
 &= \left(0,000383 \frac{\text{kg}}{\text{min}}\right) (66,443 - 60,698) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0,0022 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} = 0,0366 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Se encuentra la humedad relativa del aire al salir de la sección de calentamiento reemplazando la Ecuación 4.

$$\phi_2 = \frac{P_{v2}}{P_{sat \text{ a } 45^\circ\text{C}}} = \frac{1,871 \text{ kPa}}{9,5953 \text{ kPa}} = 0,194 = 19,4\%$$

P = presión total.

P_a = presión parcial de aire seco.

P_v = presión vapor de agua.

ω = humedad específica.

ϕ = humedad relativa.

\dot{m} = flujo masico.

\dot{v} = tasa constante de aire.

V = volumen especifico.

R = constante de los gases ideales.

C = calor especifico.

Conociendo la temperatura y la humedad relativa a la cual el aire sale de la sección de calentamiento, ahora se calcula la tasa de transferencia en la sección de enfriamiento para llegar a la temperatura mínima de 20°C.

$$T_1 = 45^\circ\text{C}; T_2 = 20^\circ\text{C}; \phi = 20\%$$

Desarrollando las ecuaciones se obtiene:

$$P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = \phi P_{sat \text{ a } 45^\circ\text{C}} = (0,8)(9,5953 \text{ kPa}) = 1,919 \text{ kPa}$$

Despejando la Ecuación 2 de la presión total:

$$P_{a1} = P_1 - P_{v1} = (73,460 \text{ kPa} - 1,919 \text{ kPa}) = 71,541 \text{ kPa}$$

Con la Ecuación 10 se halla el volumen específico:

$$V_1 = \frac{R_a T_1}{P_{a1}} = \frac{(0,287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}})(318 \text{ K})}{71,541 \text{ kPa}} = 1,276 \frac{\text{m}^3}{\text{kg de aire seco}}$$

Se calculó la humedad específica con la Ecuación 3:

$$\omega_1 = \frac{(0,622)(1,919 \text{ kPa})}{(73,460 - 1,919) \text{ kPa}} = 0,017 \frac{H_2O}{\text{kg de aire seco}}$$

Con la Ecuación 5 se hallan las entalpías del aire de acuerdo a la temperatura:

$$\begin{aligned} h_1 &= C_p T_1 + w_1 h_{g1} \\ &= \left(1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right) (45^\circ\text{C}) + (0,017)(2582,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) \\ &= 89,126 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= C_p T_2 + w_2 h_{g2} \\ &= \left(1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right) (20^\circ\text{C}) + (0,017)(2537,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) \\ &= 63,235 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Se calcula el flujo másico con la Ecuación 11:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{v}_1}{V_1} = \frac{0,00045 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{1,276 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,000353 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Se encuentra la tasa de transferencia al aire de la sección de enfriamiento mediante la

Ecuación 1 de la conservación de la energía:

$$\dot{Q}_{a1} = \dot{m}_a (h_2 - h_1)$$

$$= \left(0,000383 \frac{kg}{min}\right) (63,235 - 89,126) \frac{kJ}{kg} = 0,0091 \frac{kJ}{min} = 0,151 W$$

P = presión total.

P_a = presión parcial de aire seco.

P_v = presión vapor de agua.

ω = humedad específica.

ϕ = humedad relativa.

\dot{m} = flujo masico.

\dot{v} = tasa constante de aire.

V = volumen específico.

R = constante de los gases ideales.

C = calor específico.

C. Establecer los límites de control.

Los límites de control son:

Temperatura: $\pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: $\pm 5\%$. [26]

Se tomaron en cuenta datos como: información acerca de materiales, diseño de ductos, dimensiones y rangos de operación para los instrumentos de medición.

8.2 Diseño

Se desarrolló el modelado en 3D del prototipo del cuarto farmacéutico en Inventor, donde se especifican cada una de las partes e igualmente se generan los planos mecánicos.

Especificaciones iniciales del cuarto	
Materiales	Lamina de acero galvanizado y Yumbolon
Dimensiones	30x30x30 cm
Temperatura	25 \pm 5°C
Humedad relativa	25 \pm 5%
Caudal de aire	0,009m ³ /min
Presión diferencial	Área positiva 5 Pa mínimo

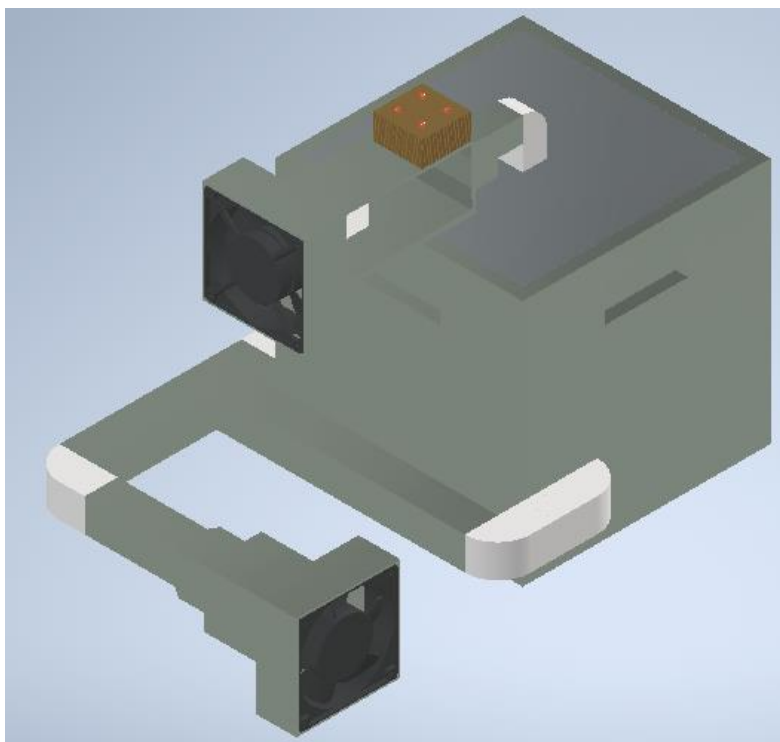


Ilustración 12. Vista 1 prototipo 3D.

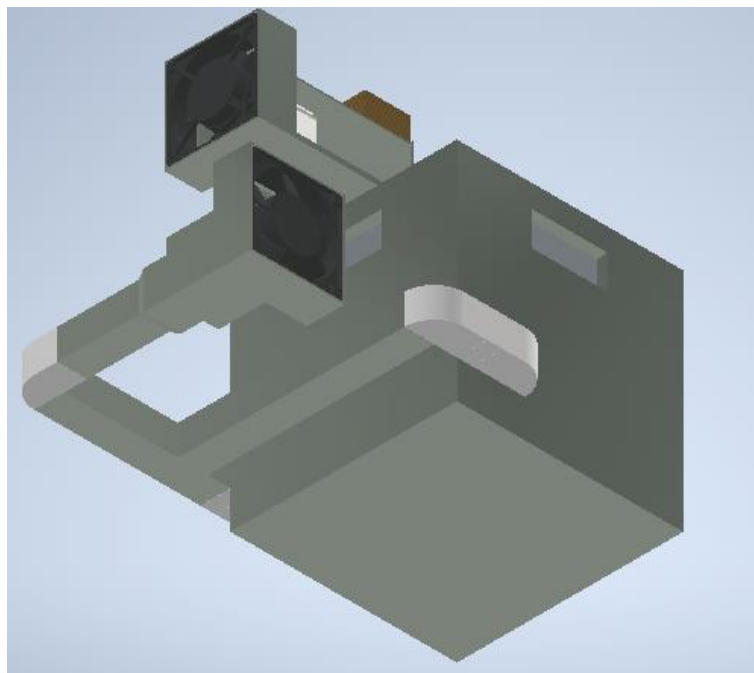


Ilustración 13. Vista 2 prototipo 3D.

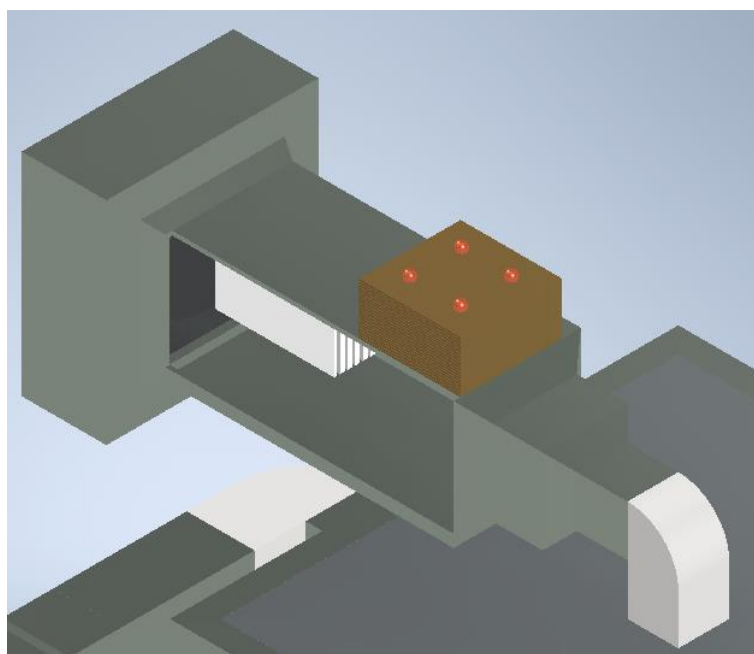


Ilustración 14. Vista UMA prototipo 3D.

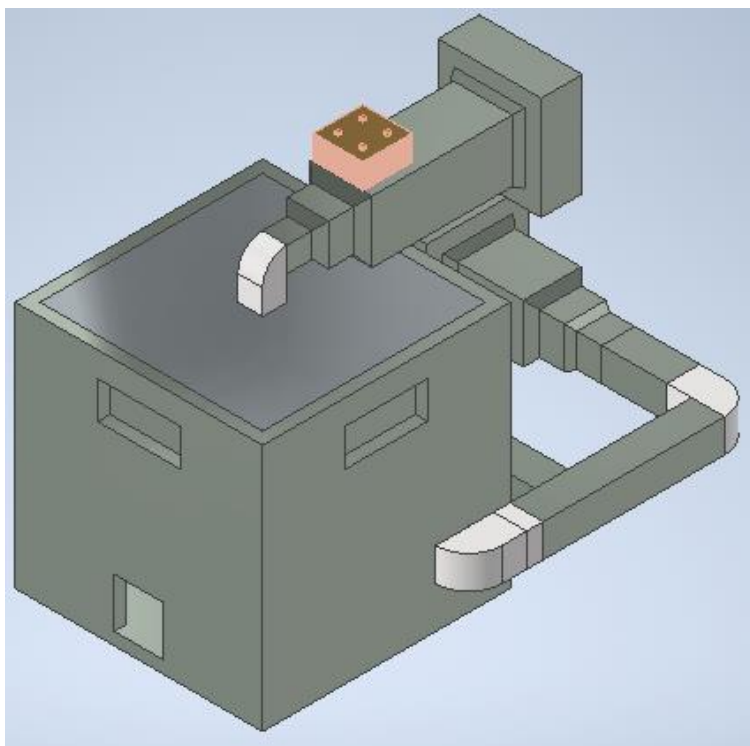


Ilustración 15. Vista 3 prototipo 3D.

En esta fase se tiene el conocimiento de los diferentes componentes a utilizar en el proyecto, donde se tuvieron en cuenta las características y especificaciones según los requerimientos propuestos para tener como resultado una correcta operación del sistema HVAC del cuarto farmacéutico. Teniendo en cuenta la ubicación de los sensores, actuadores y diferentes instrumentos en la implementación y construcción del proyecto, se estructuró la distribución de los elementos para realizar una correcta selección de los equipos.

8.2.1 Elección de componentes

En las siguientes tablas se representan cuadros comparativos donde se visualizan las características más relevantes de los componentes:

- Se elige el material de construcción del cuarto en espuma de polietileno reforzado, utilizado en cuartos de estabilidad para mantener condiciones estables ignorando variables externas que puedan interferir el proceso, como altas o bajos niveles de temperatura y humedad en el entorno.

Características Técnicas	Espuma de Polietileno	Poliestireno Expandido (EPS)	Espuma de Poliuretano
Conductividad térmica	Baja	Baja	Baja
Densidad	Ligera	Ligera a media	Media a alta
Resistencia a la compresión	Baja	Baja	Alta
Estabilidad dimensional	Buena	Buena	Buena
Resistencia a la humedad	Alta	Baja	Alta
Resistencia al fuego	Baja	Baja	Alta
Fácil instalación	Sí	Sí	Sí
Versatilidad de uso	Amplia	Amplia	Amplia
Costo	Económico	Económico	Moderado

Tabla 2. Selección material aislante.

Características Técnicas	Lámina de Acero Galvanizado	Lámina de Acero Inoxidable	Lámina de Aluminio
Resistencia a la corrosión	Alta	Alta	Alta
Resistencia mecánica	Alta	Alta	Media a alta
Conductividad térmica	Baja	Baja	Alta
Fluencia	Moderada a alta	Baja a moderada	Baja
Peso específico	Medio	Medio a alto	Bajo
Resistencia a la intemperie	Buena	Muy buena	Buena
Aplicaciones comunes	Construcción, techos, revestimientos	Equipamiento médico, industria alimentaria	Construcción, carrocerías
Costo	Moderado	Alto	Moderado a alto

Tabla 3. Selección material estructural.

- Es seleccionado el ventilador **AFB0812SH**, por ser un equipo que suministra más del caudal requerido en el proceso y presenta un tamaño accesible con respecto a las dimensiones del cuarto y un bajo consumo en el sistema. Además, de tener mayor vida útil comparado a los demás y ser compatible con el procesador.

Características Técnicas	AFB0812SH	AF120	FD120
Dimensiones	80mm x 80mm x 25mm	120mm x 120mm x 25mm	120mm x 120mm x 25mm
Tipo de rodamiento	Rodamiento de bolas	Rodamiento de bolas	Rodamiento de fluido
Voltaje de operación	12V	12V	12V
Corriente de operación	0.20A	0.30A	0.15A
Velocidad de rotación	4000 RPM	1500 RPM	2000 RPM
Flujo de aire	41.5 CFM	52.3 CFM	64.4 CFM
Presión estática	1.34 mmH ₂ O	0.75 mmH ₂ O	1.68 mmH ₂ O
Nivel de ruido	29.5 dB(A)	26.4 dB(A)	31.6 dB(A)
Conexión	Conector de 3 pines	Conector de 3 pines	Conector de 3 pines
Vida útil	50,000 horas	40,000 horas	30,000 horas

Tabla 4. Selección ventiladores.

- Se escoge el sensor DHT22, ya que proporciona una configuración rápida en el procesador y confiable respecto a la variable de temperatura y humedad. Se puede instalar fácilmente, tiene más rango de temperatura y es adecuado para el funcionamiento del cuarto.

Características Técnicas	DHT22	HTU21D	SHT31
Rango de temperatura	-40°C a 80°C	-40°C a 125°C	-40°C a 125°C
Rango de humedad	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%
Precisión de temperatura	±0.5°C	±0.3°C	±0.3°C
Precisión de humedad	±2%	±2%	±2%

Resolución de temperatura	0.1°C	0.01°C	0.01°C
Resolución de humedad	0.1%	0.04%	0.04%
Alimentación	3.3V a 5V	2.1V a 3.6V	2.4V a 5.5V
Interfaz de comunicación	Una sola línea de datos	I2C	I2C, SPI, y UART
Consumo de corriente	2.5mA (máx.)	0.06mA (en reposo)	0.5mA (en reposo)
Salida de voltaje	Digital (señal de datos)	Digital (señal de datos)	Digital y Analógica
Dimensiones	15.5mm x 12mm x 5.5mm	15mm x 12.5mm x 3mm	15.5mm x 11.5mm x 2.7mm

Tabla 5. Selección sensor temperatura-humedad.

- Es seleccionado el sensor **MPS20N0040D-S** por dos razones importantes; la primera es que por motivos de requerimientos en equipos respiratorios en clínicas y hospitales los sensores de presión diferencial estaban totalmente agotados en mercado. La segunda razón es que estos sensores de presión se pudieron posicionar en puntos estratégicos y tener valores más precisos al realizar la resta diferencial desde el programa.

Características Técnicas	MPS20N0040D-S	MPX10DP	BMP280
Rango de presión	0-40 kPa	-10 a 10 kPa	300-1100 hPa
Tipo de sensor	Absoluto	Diferencial	Absoluto y diferencial
Voltaje de alimentación	5V	5V	1.8-3.6V
Sensibilidad	100 mV/kPa	45 mV/kPa	Configurable
Precisión	±1.5%	±2%	±1 hPa
Resolución	0.001 kPa	0.001 kPa	0.18 Pa
Tiempo de respuesta	<1 ms	1 ms	Configurable
Temperatura de operación	-40°C a 125°C	-40°C a 125°C	-40°C a 85°C
Interfaz de comunicación	Analógica	Analógica	I2C y SPI

Dimensiones	20mm x 10mm x 7mm	10.2mm x 10.2mm	3.6mm x 2.5mm
Aplicaciones	Automotriz	Automatización	Meteorología
	Industrial	Control de procesos	

Tabla 6. Selección sensor presión diferencial.

- Es seleccionado el procesador **NodeMCU-32** por ser una dashboard robusta, sólida y estar integrado en el dispositivo el módulo de conexión WIFI y conexión bluetooth. Además, de contar con almacenamiento EEPROM de 64Mb y tener un precio accesible en el comercio.

Características Técnicas	Arduino	Raspberry Pi 0	NodeMCU-32
Procesador	Microcontrolador AVR	ARM1176JZF-S	ESP32
Velocidad del procesador	Varios MHz	1 GHz	Hasta 240 MHz
Núcleos	1	1	2
Memoria RAM	2 KB en ATmega328P	512 MB	520 KB
Memoria Flash	32 KB en ATmega328P	MicroSD	4 MB
GPIO	Varios pines digitales	40 pines GPIO	38 pines GPIO
Comunicación serial	Sí	Sí	Sí
Comunicación WiFi	No	No	Sí
Comunicación Bluetooth	No	No	Sí
Comunicación Ethernet	Algunos modelos	No	No
Sistema operativo	Ninguno	Linux (Raspbian)	Ninguno
Programación	Lenguaje Arduino	Varios lenguajes	Lenguaje Arduino y Lua

Tabla 7. Selección microprocesador.

Instrumento/ Material	Refrigeración	Instrumento seleccionado
Opción 1	Unidad de refrigeración industrial	Las celdas peltier fueron escogidas por proporcionar un enfriamiento correcto y el requerido para la unidad de manejadora de entrada de aire. Además, por su tamaño reducido favorece la instalación.
Opción 2	Celda Peltier Tec1-12706K10	

Tabla 8. Selección sistema de refrigeración.

Instrumento/ Material	Calentamiento	Instrumento seleccionado
Opción 1	Resistencias	Se realiza la fabricación de un intercambiador a escala según tamaño de los ductos, con dos resistencias de calentamiento. Se escoge esta opción, ya que se investigó en diferentes lugares y no se encontró uno del tamaño y consumo adecuado.
Opción 2	Intercambiador comercial	

Tabla 9. Selección sistema de calentamiento.

8.2.2 Características de los componentes

A continuación, se detalla las especificaciones técnicas de los componentes utilizados en la construcción del prototipo.

Especificaciones técnicas	
Nombre	Yumbolon
Características	Módulo de polietileno reforzado
Calibre	1cm
Cantidad	1mx1,5m (1,5 m2)

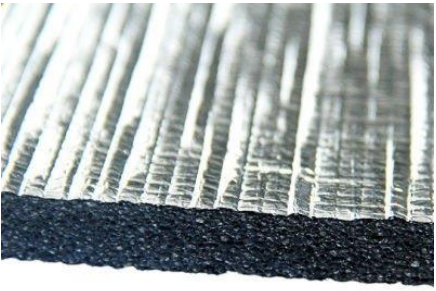
Imagen	
--------	--

Tabla 10. Especificaciones del aislamiento.

Ventiladores

Especificaciones técnicas	
Nombre	Ventilador Brussless DC
Referencia	BAFB0812SH
Cantidad	2
Alimentación	12VDC
Consumo	0,51A
Dimensiones	8cm x 8cm
Caudal	1,320 m ³ /min
Imagen	

Tabla 11. Especificaciones ventiladores.

Sensores de temperatura/humedad

Especificaciones técnicas	
Nombre	Sensor de temperatura y humedad
Referencia	DHT22 AM2303
Tipo	Capacitivo
Alimentación	3,3-6VDC
Rangos de operación	Humedad Relativa 0-100% Temperatura -40~80 °C

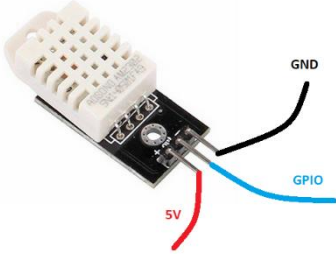
Exactitud	Humedad Relativa +/- 2% (Max +/-5%) Temperatura +/-5 °C
Sensibilidad	Humedad Relativa 0,1% Temperatura 0,1 °C
Dimensiones	22mm*28mm*5mm
Imagen	

Tabla 12. Especificaciones sensor temperatura y humedad.

Sensor de presión diferencial


Especificaciones técnicas	
Nombre	Sensor de presión diferencial
Referencia	MPS20N0040D-S
Cantidad	6
Alimentación	5VDC
Señal de salida	mV
Medios de contacto	Gases limpios, secos y no corrosivos
Dimensiones	10.3mmx7mmx9,5mm
Imagen	

Tabla 13. Especificaciones sensor de presión diferencial.

Sistema de refrigeración

Especificaciones técnicas	
Nombre	Celda Peltier
Referencia	Tec1-12706K10
Voltaje de operación	12VDC
Potencia eléctrica máxima	107,8W

Potencia calorífica máxima	62,2W
Máxima temperatura operación cara caliente	180°C
Máxima temperatura operación cara fría	-50°C
Dimensiones	40mm x 40mm x 3,6mm
Imagen	

Tabla 14. Especificaciones celda peltier.

Sistema de calentamiento

Especificaciones técnicas	
Nombre	Intercambiador
Referencia	Fabricación propia
Cantidad	3
Voltaje de operación	110VAC
Amperaje	89,06 mA
Potencia	9,87 W
Resistencia	478 ohmios
Imagen	

Tabla 15. Especificaciones intercambiador.

Microprocesador

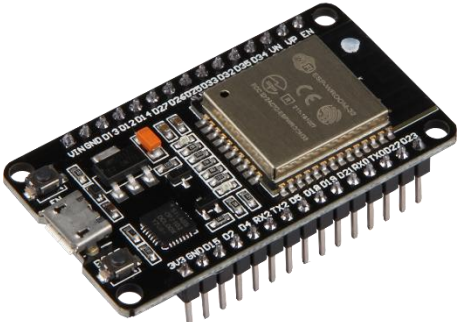
Especificaciones técnicas	
Nombre	NoDE MCU ESP32
Voltaje de entrada USB	5V
Voltaje de salida de los pines	3,3V
Entradas/Salidas	25 digitales
Corriente nominal por pin	40mA
Frecuencia	Microprocesador 32 bit Xtensa LX6 de doble núcleo
Almacenamiento	EEPROM 64Mb
Comunicación	Doble serial, WIFI y bluetooth
Imagen	

Tabla 16. Especificaciones microprocesador.

8.2.3 Tablas comparativas requerido vs suministrado

Valores requeridos

- Rango de temperatura y humedad: $25 \pm ^\circ \text{C}$ y $25 \pm \%$
- Potencia calorífica de calentamiento: 0,0366 W
- Potencia calorífica de enfriamiento: 0,151 W

Elemento seleccionando	Especificaciones técnicas	Descripción
Sensor de humedad relativa y temperatura DHT22	Voltaje de Operación: 3V - 6V DC Rango de medición de temperatura: -40°C a 80 °C Precisión de medición de temperatura: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Resolución Temperatura: 0.1°C Rango de medición de humedad: De 0 a 100% RH Precisión de medición de humedad: 2% RH Resolución Humedad: 0.1%RH Tiempo de sensado: 2s Interface digital: Single-bus (bidireccional) Modelo: AM2302 Dimensiones: 22*28*5 mm Peso: 3 gr. Carcasa de plástico blanco	El sensor digital de temperatura y humedad relativa DHT22 (AM2302) es una opción de bajo costo y alto rendimiento. Este sensor está equipado con un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir las condiciones del aire. Los datos generados por el sensor son transmitidos digitalmente a través del pin de datos, ya que el DHT22 no tiene una salida analógica. El DHT22 se puede utilizar en una variedad de aplicaciones, incluyendo el control automático de temperatura, el monitoreo ambiental en la agricultura, la climatización, entre otros.
Celda peltier Tec1-12706K10	Tamaño: 40*40*3.6mm Resistencia: 2.1~2.5Ohm Cantidad de termopares: 127 Diferencia de temperatura máxima entre caras: 69 °C Máxima temperatura de operación cara caliente: 83 °C Mínima temperatura de operación cara fría: -55°C Voltaje: DC 12V Voltaje Max: DC 15V Qcmax: 58-60W Potencia eléctrica: 107,8 W Potencia calorífica: 62,2 W	Los enfriadores termoeléctricos o Peltier (TEC) son capaces de generar una diferencia de temperatura entre sus caras gracias a una corriente que circula por su interior. Esta corriente permite que una de sus caras se enfríe mientras que la otra se caliente. Este proceso permite a los enfriadores TEC enfriar objetos por debajo de la temperatura ambiente en contacto con su cara fría, bajo la condición de que se dispongan los medios para refrigerar la cara "caliente". Al invertir la polaridad de la corriente, la cara fría se convierte en caliente y viceversa, lo que a su vez altera el sentido del flujo calorífico.
Resistencia termica PR4	Voltaje de operación: 110 VAC Resistencia: 478 Ohmios Tolerancia de resistencia: $\pm 30\% \sim \pm 50\%$ Potencia: 15W Temperatura de trabajo: -25 °C ~ +125 °C, 0 ~ +60 °C Tolerancia a la temperatura de la superficie: $\pm 3^{\circ}\text{C} \sim \pm 10^{\circ}\text{C}$	Los intercambiadores de calor son la solución perfecta para generar calor en fluidos por medio de convección forzada. Este sistema fundamenta su funcionamiento en el uso de resistencias eléctricas que están en contacto directo con el fluido a ser calentado en el intercambiador de calor de fluido a fluido. El calor se transfiere eficientemente a través del uso de deflectores cuidadosamente diseñados para aprovechar al máximo el calor generado por las resistencias eléctricas. De esta forma, el intercambio de calor está garantizado en el proceso.

Valores requeridos

- Resistencia de material 40 kPa

Lamina de acero galvanizado	Espesor 10.00 mm Fluencia: 230 MPa Resistencia: 310 MPa Elongación mínima: 20 % Recubrimiento mínimo: 90 g/m2	La lámina de acero galvanizado es conocida por su proceso de galvanización, en el cual se recubre con una capa de zinc mediante inmersión en caliente. Este proceso actúa como una barrera protectora que defiende al metal contra factores ambientales como la humedad, la oxidación y la contaminación. Al proveer una capa de recubrimiento, el galvanizado aumenta significativamente la resistencia del acero ante fuerzas externas, prolongando así su vida útil. En resumen, el proceso de galvanización es lo que hace que la lámina galvanizada sea un material altamente confiable y resistente para su uso en numerosas aplicaciones industriales y comerciales.
-----------------------------	---	---

Valores requeridos

- Temperatura de trabajo 15-35°C

Modulo de polietileno reforzado o Yumbolon	Composición: Polietileno, GSM, agente espumante. Temperatura de trabajo: Resiste hasta -50 °C - 70 C° Espesor: 10,50 milímetros (±0,10) Anchura: 1 metro (±0,01) - Densidad (Kg/m3) (± 5%): 25 Resistencia a compresión 10%: 8,13 mm Resistencia a compresión 25%: 26,78 mm Resistencia a tracción Longitudinal: 213,14 mm Resistencia a tracción transversal: 167,38 mm Alargamiento a la rotura longitudinal: 107,2 mm Alargamiento a la rotura transversal: 77,01 mm Absorción al agua por inmersión (Kg/m3): 1,3 mm Conductividad térmica (W/m*K): 0,046 mm reflecta hasta un 95% de la radiación calórica.	El Yumbolon es una termo espuma que ofrece una variedad de funciones útiles, como aislamiento térmico, impermeabilización y características antiestáticas. Este producto de alta versatilidad está compuesto por una lámina de aluminio puro y es capaz de brindar aislamiento hidrotermo constante a diferentes conductos de calefacción, aire acondicionado y circuitos de refrigeración. Además, el Yumbolon puede atenuar el ruido exterior, amortiguar las pisadas y prevenir filtraciones no deseadas. Es un material no tóxico, amigable con el medio ambiente y fácil de manipular sin necesidad de conocimientos técnicos previos.
--	---	---

8.3 Ensamble

8.3.1 Herramientas y equipos utilizados en el proceso

Inicialmente se seleccionaron las herramientas y equipos que fueron necesarios para la construcción del prototipo y ayudaron con el ensamble de cada una de las piezas, las cuales se relacionan en la siguiente Tabla 17.

N°	NOMBRE	IMAGEN	FUNCIÓN	USO
----	--------	--------	---------	-----

1	Tijera para lamina		Herramienta manual para realizar cortes de láminas de calibres varios .	Se manejaron para cortar las láminas utilizadas en la construcción del cuarto y las unidades.
2	Flexómetro		Instrumento que sirve para tomar de medidas de superficies rectas.	Se utilizó para medir cada una de las piezas del ensamble mecánico.
3	Bisturí		Herramienta que sirve para realizar cortes en materiales suaves.	Se utilizó para cortar el polietileno reforzado que cumple la función de aislante del cuarto.
4	Taladro		Máquina que facilita hacer agujeros de múltiples diámetros.	Se usó para realizar las perforaciones en las unidades de aire y en el cuarto para la ubicación de los sensores.
5	Pinza voltiamperimetrica		Herramienta con la cual se realizan mediciones eléctricas.	Se utilizó para verificar la conexión eléctrica del prototipo y las salidas de la fuente de voltaje.




6	Pinza pelacables		Herramienta con la cual se puede manipular, cortar y pelar el cableado eléctrico.	Se usó para manipular el cableado eléctrico.
7	Atornilladores		Herramienta con la cual se ajustan o desajustan tornillos.	Se utilizó para ajustar los tornillos que fijan la estructura.
8	Cautín		Herramienta que permite soldar diferentes uniones en los sistemas eléctricos.	Se utilizó para realizar las múltiples soldaduras del sistema eléctrico.

Tabla 17. Herramientas y equipos.

8.3.2 Implementación del control PID

Para la implementación del control PID, se referencia primero un modelo discreto PID, discretizando la ecuación continua *Ecuación 6* en función de transferencia del dominio Z.

$$C(Z^{-1}) = \frac{u(k)}{e(k)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

Ecuación 12. Discretización de ecuación continua.

Donde:

$$q_0 = k_p \left[1 + \frac{T_s}{2t_i} + \frac{t_d}{T_s} \right]$$

Ecuación 13. Descripción q_0 .

$$q_1 = -k_p \left[1 - \frac{T_s}{2t_i} + \frac{2t_d}{T_s} \right]$$

Ecuación 14. Descripción q1.

$$q_2 = \frac{k_p t_d}{T_s}$$

Ecuación 15. Descripción q2.

Donde $T_s =$ es el tiempo de muestreo que en el prototipo es de 8s.

Se despeja $u(k)$ de la *Ecuación 12* y se obtiene la siguiente ecuación.

$$u(k)(1 - z^{-1}) = q_0 e(k) + q_1 z^{-1} e(k) + q_2 z^{-2} e(k)$$

$$u(k) - u(k)z^{-1} = q_0 e(k) + q_1 z^{-1} e(k) + q_2 z^{-2} e(k)$$

$$u(k) = u(k)z^{-1} + q_0 e(k) + q_1 z^{-1} e(k) + q_2 z^{-2} e(k)$$

Se aplica la transformada inversa Z para obtener la ecuación en diferencias:

$$u(k) = u(k - 1) + q_0 e(k) + q_1 e(k - 1) + q_2 e(k - 2)$$

Ecuación 16. Control PID discreto. [27]

La función de transferencia de la planta de primer orden *Ecuación 7* para la variable de humedad se obtiene en base a pruebas realizadas con el sensor de temperatura/humedad del prototipo. Se activó la salida de las resistencias del intercambiador al 100% y se verifico en que tiempo el sistema estabiliza las variables.

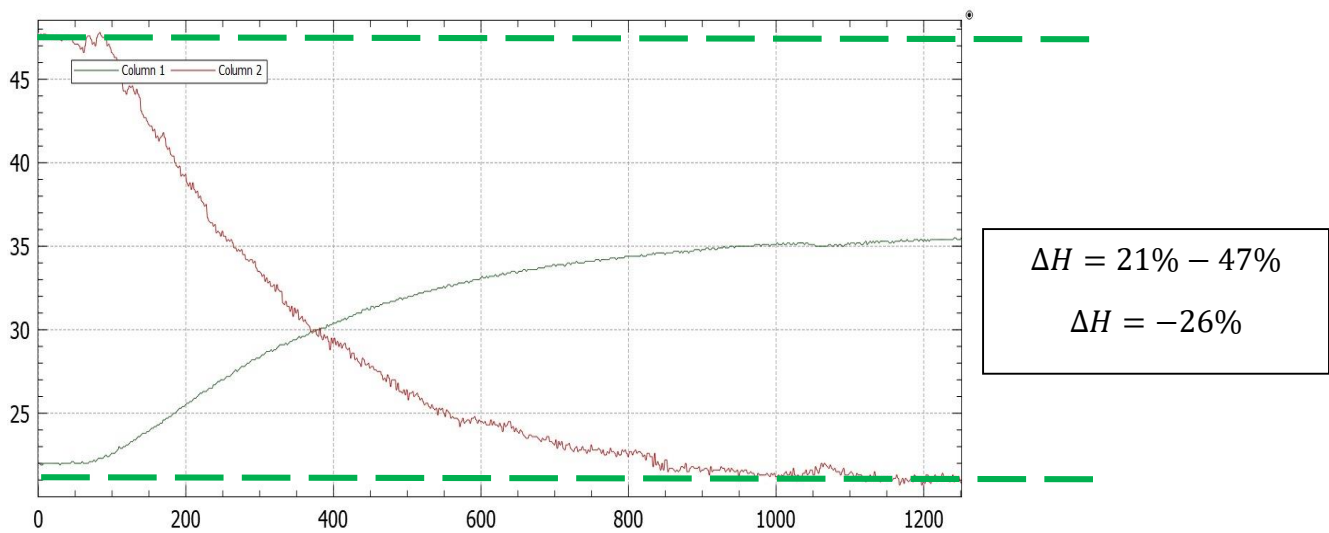


Ilustración 16. Grafica de estabilización humedad/temperatura

El porcentaje de salida establecido fue del 100%, ya que se trabajó con relé mecánico.

$$\Delta U = 100\% - 0\% = 100\%$$

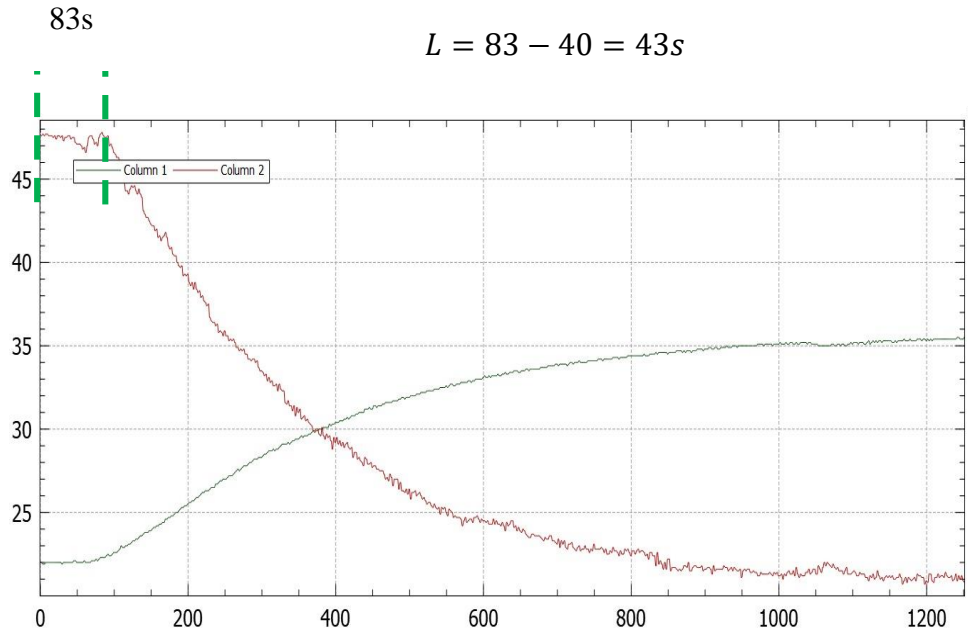
El tiempo de estabilización fue de 900 segundos, con lo cual se halla la constante de tiempo.

$$\tau = \frac{T_{ss}}{4} = \frac{900}{4} = 225s$$

$$K = \frac{H_{Final} - H_{Inicial}}{U_{Final} - U_{Inicial}}$$

$$K = \frac{-26}{100} = -0,26\%$$

El valor de L es donde comienza a observarse un cambio en la gráfica, la salida para el intercambiador se activa a los 40 segundos y en la gráfica se observa el cambio desde los 83 segundos.



Obteniendo los valores de $k = 0,26$, $T_s = 225$ s, $L_s = 43$ s

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{0,26e^{-43s}}{225s + 1}$$

Ecuación 17. Función de transferencia de planta.

Con la función de transferencia de la planta se grafica en simulink-Matlab, donde se obtiene el siguiente esquema, colocando un set point de 25% de humedad en el escalón de entrada.

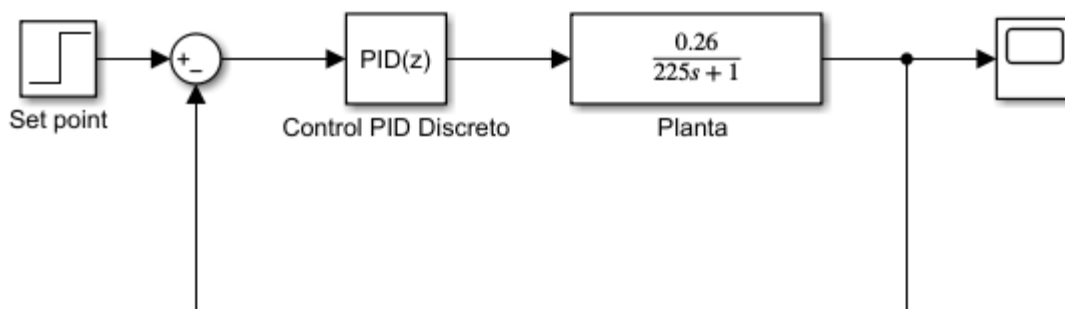


Ilustración 17. Diagrama simulink.

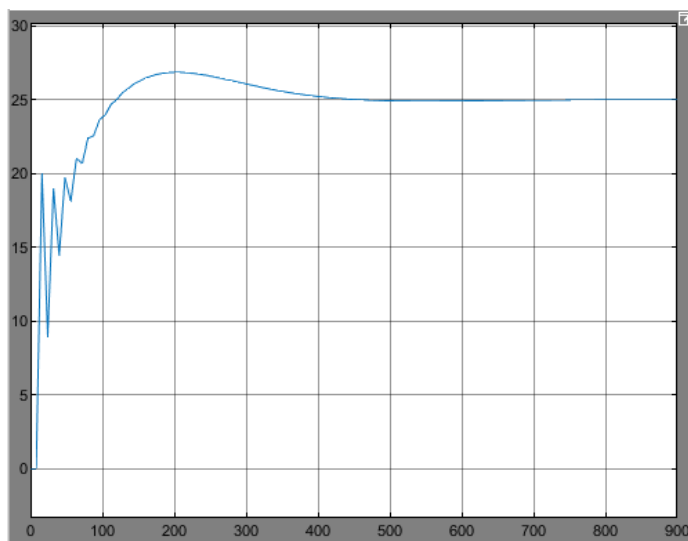


Ilustración 18. Grafica simulink.

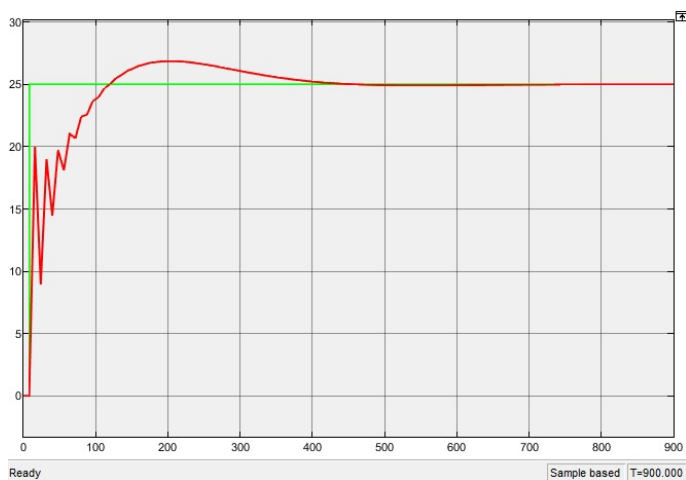


Ilustración 19. Grafica señal de referencia vs variable de proceso Simulink.

En base a la *Tabla 1. Sintonía de Ziegler y Nichols.* se hallan los valores de K_p , T_i y T_d .

$$K_p = \frac{1,2(150)}{1,04(14)} = 12,36$$

Ecuación 18. Ganancia proporcional.

$$T_i = 2(14) = 28$$

Ecuación 19. Tiempo integral.

$$T_d = 0,5(14) = 7$$

Ecuación 20. Tiempo derivativo.

8.3.3 Diagrama lazo de control de temperatura

A continuación, se ilustra el lazo de control cerrado con los componentes para la variable de humedad, donde se puede observar el controlador, intercambiador, proceso y sensor.

Igualmente, al punto anterior, se indica las partes de cada etapa que conforman el lazo de control para la variable de humedad.

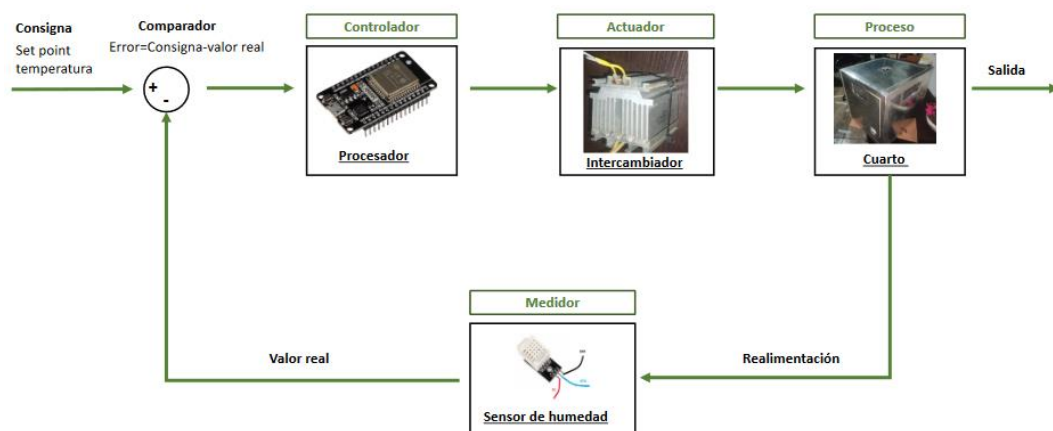


Ilustración 20. Lazo de control de humedad.

8.3.1 Diagrama lazo de control de humedad

Igualmente, al punto anterior, se indica las partes de cada etapa que conforman el lazo de control para la variable de temperatura.

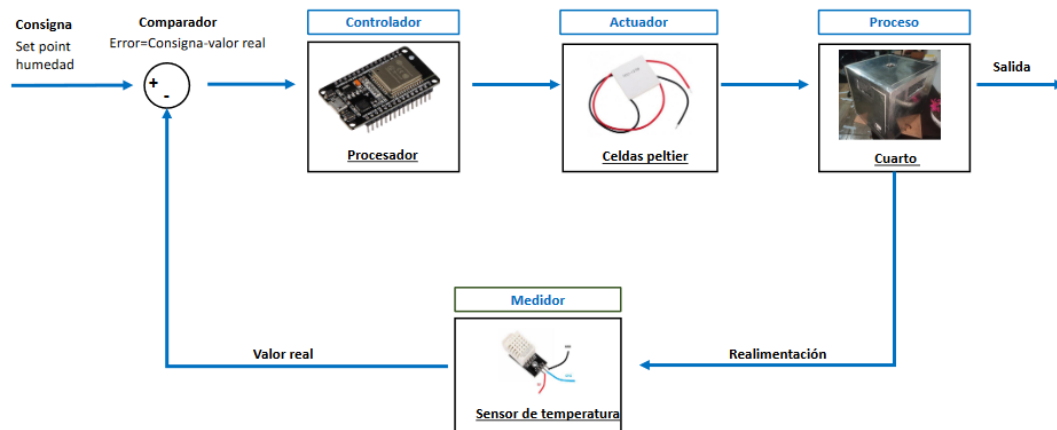


Ilustración 21. Lazo de control de temperatura.

8.3.2 Diagrama lazo de control de presión diferencial

Finalmente, se realiza el mismo proceso de identificación de elementos para el lazo de control cerrado con la variable de presión diferencial.

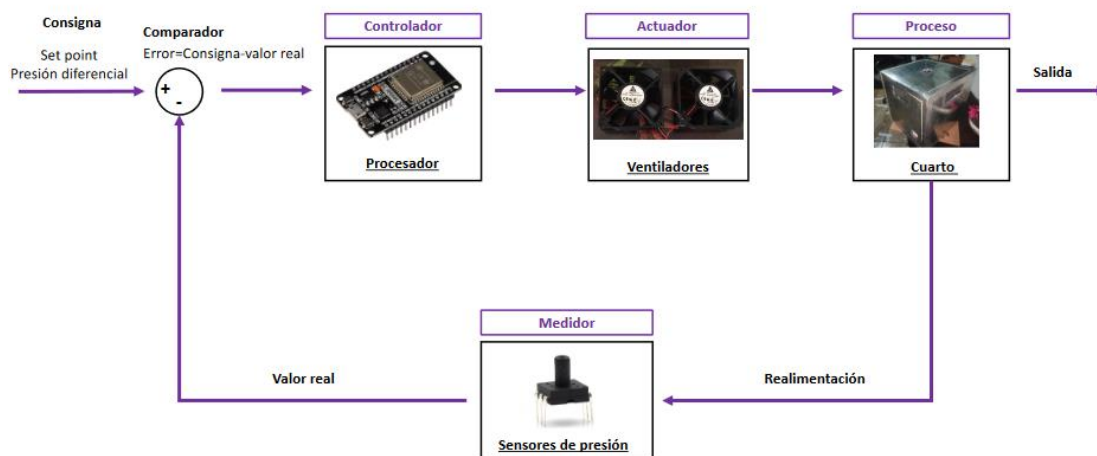


Ilustración 22. Lazo de control de humedad.

8.3.3 Construcción del cuarto

Se construye el cuarto en icopor, se cortaron las láminas con el bisturí, se ensambló la estructura y se sellaron las paredes del cuarto para garantizar la hermeticidad. Adicionalmente se dejan las aperturas donde van instalados los ductos de la unidad de suministro, extracción y los sensores.



Ilustración 23. Corte y ensamble del cuarto.

En el proceso de construcción del cuarto con icopor se presentaron problemas debido a que las condiciones del entorno afectaban las lecturas de los sensores. Se opta por cambiar el material por módulo de polietileno reforzado el cual es mejor aislante para controlar las variables de trabajo del cuarto y tiene mayor capacidad de absorción de impacto, ruido, energía y vibraciones.



Ilustración 24. Ensamble cuarto módulo de polietileno reforzado.

Al finalizar el ensamble del cuarto se evidencio que la estructura no era estable debido a que el módulo de polietileno reforzado no es rígido, para corregir este problema se construyó un cuarto en lámina de acero galvanizado y se recubrió con el polietileno.



Ilustración 25. Cuarto en lámina de acero recubierto.

8.3.4 Construcción de la unidad de suministro

Se construyó la unidad manejadora de enfriamiento y calefacción utilizando la lámina de acero galvanizado para la fabricación de la parte exterior y la ductería que conecta al cuarto.



Ilustración 26. Exterior y ductos unidad manejadora de enfriamiento y calefacción.

Se ensambla la unidad, se sellaron con cinta foil reforzada las posibles fugas en cada una de las uniones, se realizan las perforaciones en donde van a ir ubicados los intercambiadores de calentamiento y enfriamiento.



Ilustración 27. Ensamble unidad manejadora de enfriamiento y calefacción.

Se instalaron los intercambiadores (celdas peltier y resistencias), los motores ventiladores de suministro y refrigeración para las celdas peltier, se deja una puerta en la parte lateral para poder intervenir la unidad.



Ilustración 28. Montaje intercambiadores y motores-ventiladores.

8.3.5 Construcción de la unidad de extracción

Se construyó la unidad de extracción utilizando lámina de acero galvanizado para fabricar la parte exterior y la ductería que conecta al cuarto.

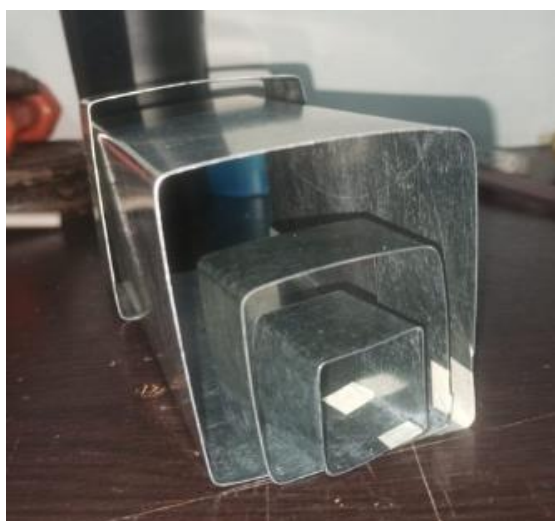


Ilustración 29. Exterior y ductos unidad de extracción.

Se ensambló la unidad, se sellaron con cinta foil reforzada las posibles fugas en cada una de las uniones, se instaló el motor ventilador de extracción y se deja una puerta en la parte lateral para poder intervenir la unidad.



Ilustración 30. Unidad de extracción.

8.3.6 Ensamble general

Se construyó la ductería en lámina de acero galvanizado, con las que se conectaron las unidades de suministro y extracción con el cuarto, estas se sellaron con cinta foil reforzada para eliminar pérdidas de presión que pudieran afectar el sistema.

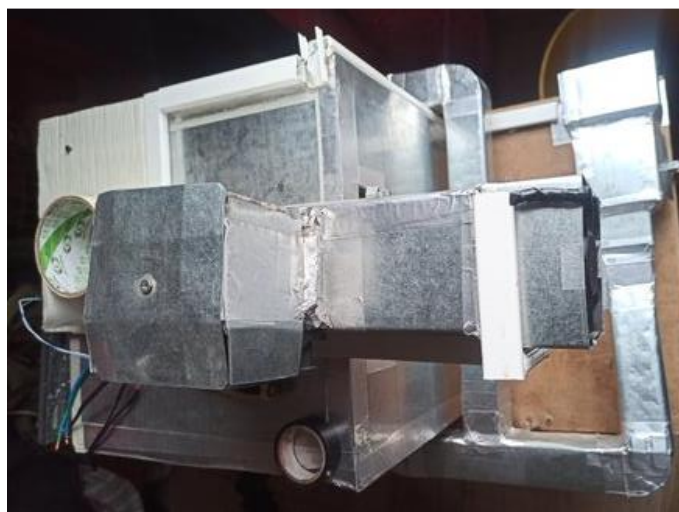


Ilustración 31. Ductería y ensamble general.

Este fue el proceso de ensamble de la parte mecánica del prototipo, para este se tuvieron en cuenta diferentes materiales, herramientas y requirió de múltiples pruebas para determinar que cada una de las partes seleccionadas cumpliera con los requerimientos de diseño y desempeño.

8.3.7 Construcción de las tarjetas electrónicas

Se realizó un banco de ensayos con el cual se hicieron las pruebas de los sensores, este banco contaba con microprocesador Arduino el cual facilita la conexión de componentes y el desarrollo del código, esta placa no se seleccionó debido a que no contaba con almacenamiento de memoria.

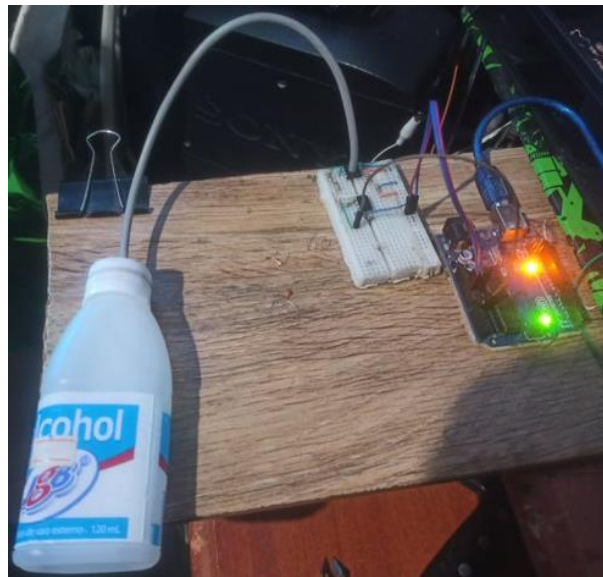


Ilustración 32. Banco de ensayos.

Se realizó la construcción de la tarjeta procesadora utilizando inicialmente un microchip y luego un Raspberry Pi zero, pero este último no cuenta con modulo wifi

integrado y no cumplía las necesidades del prototipo, se opta por el cambio al microcontrolador NodeMCU-32.

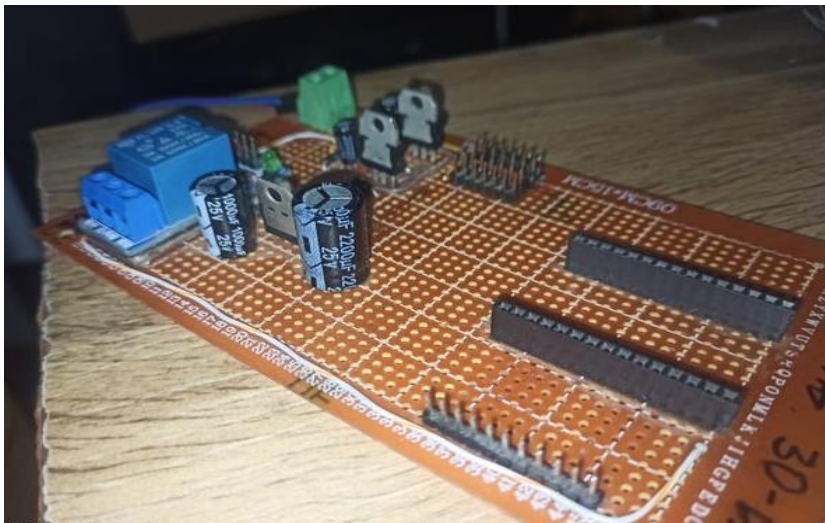


Ilustración 33. Ensamble tarjeta procesadora.

En la tarjeta se ensamblan los relés de calentamiento y enfriamiento, las fuentes de diferente voltaje, los pines de conexión para alimentación de procesador y sensores de presión, temperatura y humedad.

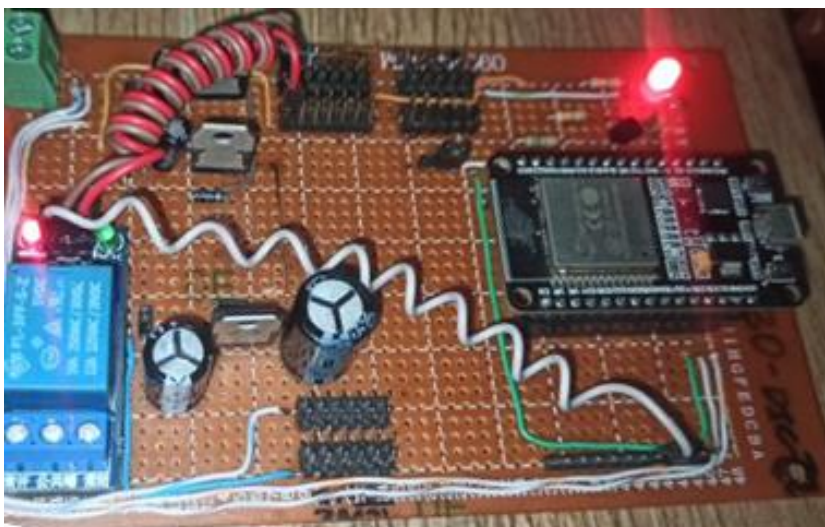


Ilustración 34. Conexión tarjeta procesadora.

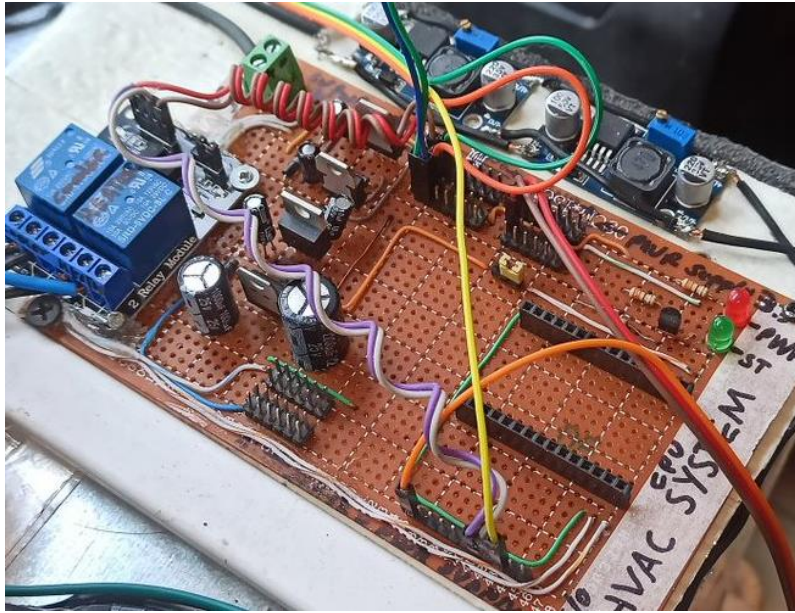


Ilustración 35. Conexión tarjeta procesadora.

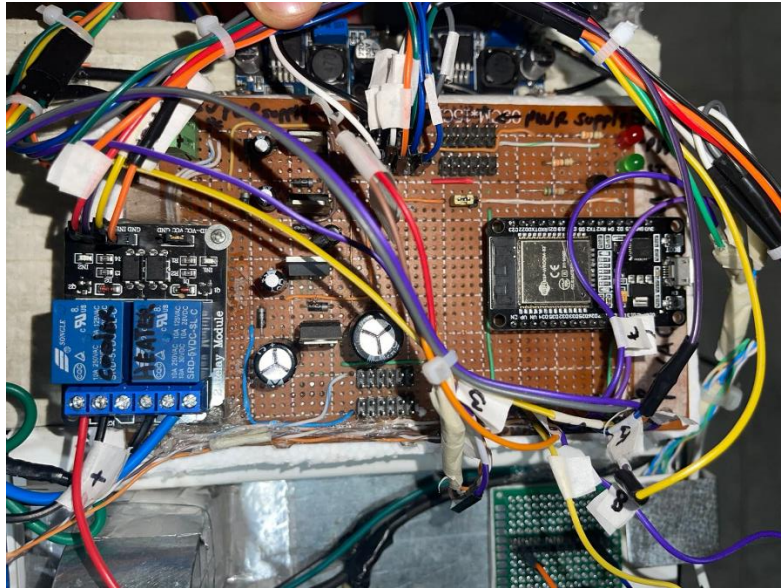


Ilustración 36. Tarjeta principal final.

Igualmente, se diseña la tarjeta que alimenta y regula el voltaje de los ventiladores por medio de driver (L293D), destinando bornas de conexión para la salida de los ventiladores es de suministro, extracción y refrigeración de las celdas peltier.

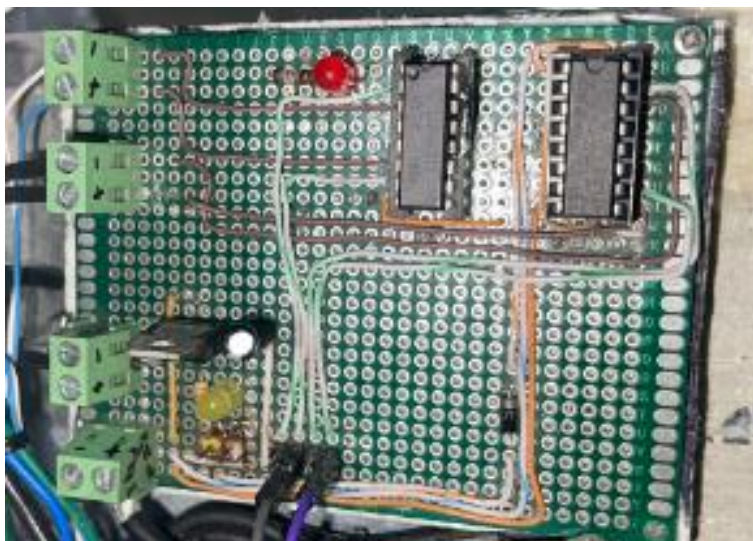


Ilustración 37. Drivers de velocidad ventiladores.

Para la conexión de los sensores de presión, se realizan tarjetas independientes con un circuito recomendado por el fabricante, donde se hace la conexión con el amplificador industrial. Cada tarjeta cuenta con el sensor, resistencias, amplificador, dos pines de alimentación y el pin de salida de señal.

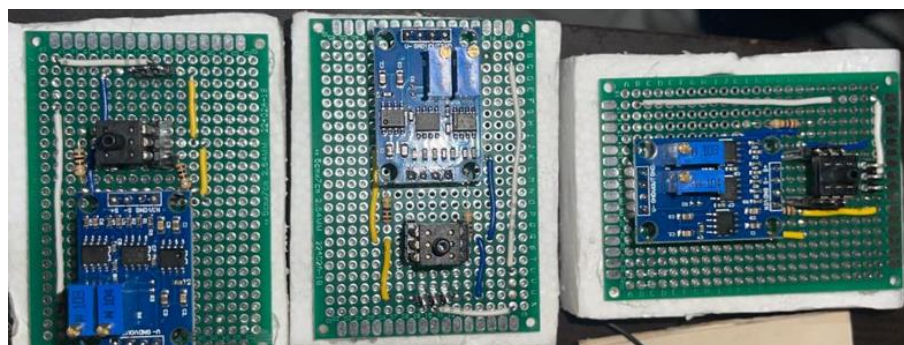


Ilustración 38. Ensamblaje tarjetas de presión.

Finalmente, se realiza la conexión y ensamble de todas las tarjetas fabricadas que se emplearon para el funcionamiento del prototipo.

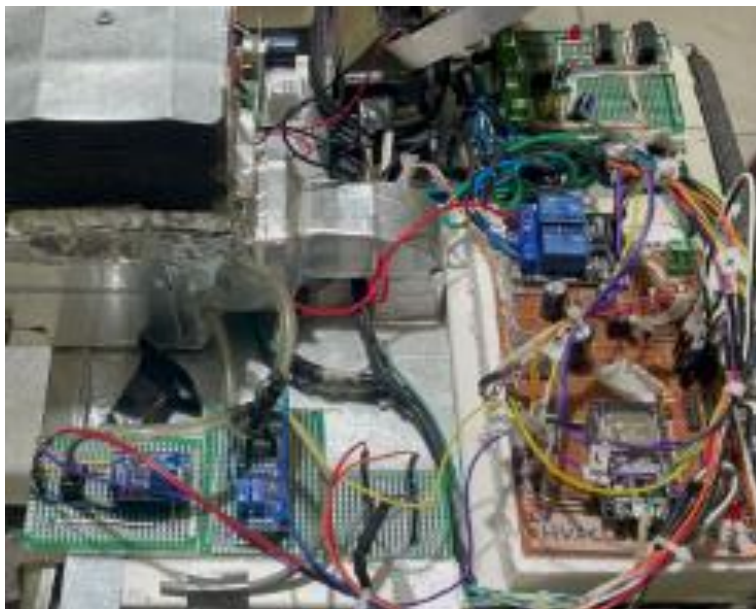


Ilustración 39. Ensamblaje tarjetas eléctricas.

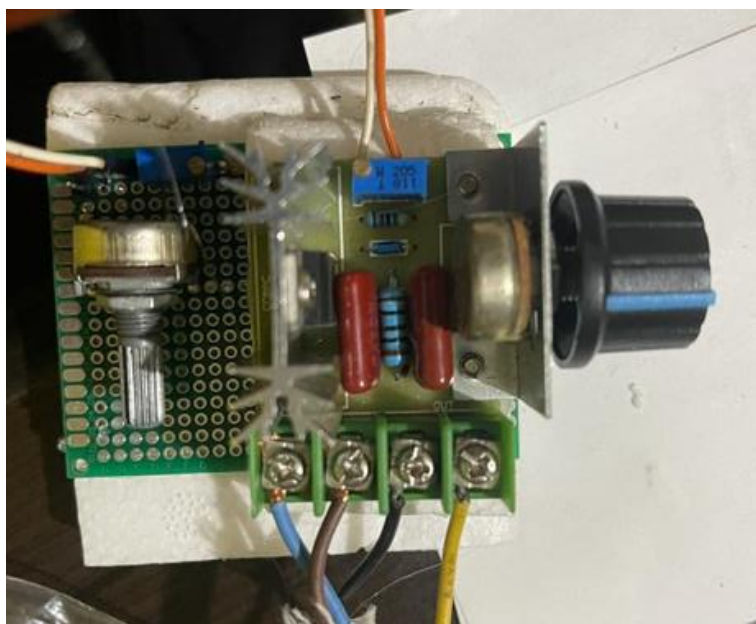


Ilustración 40. Tarjeta dimmer motor suministro.

Igualmente, la conexión y montaje de los sensores de presión, temperatura y humedad en el prototipo.

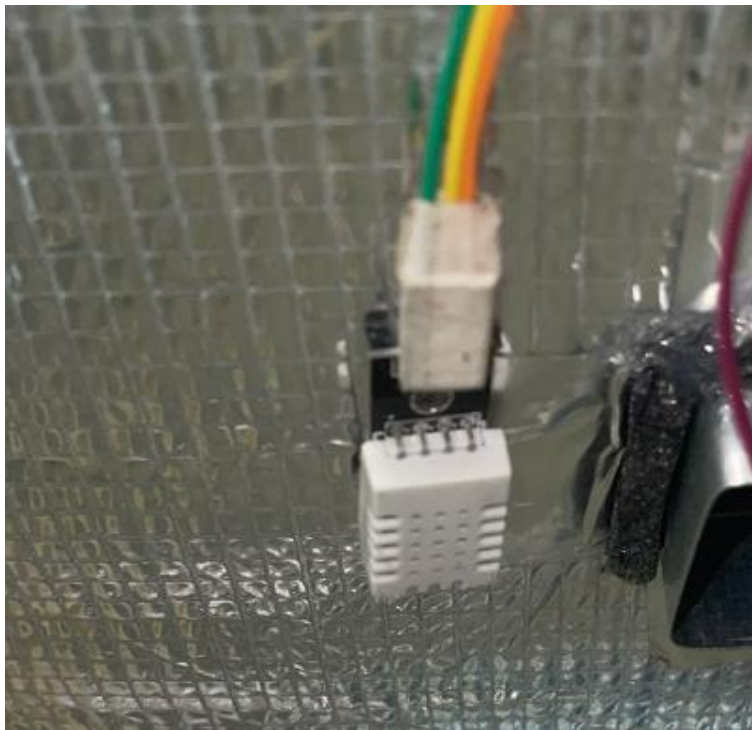


Ilustración 41. Sensor humedad-temperatura en cuarto.

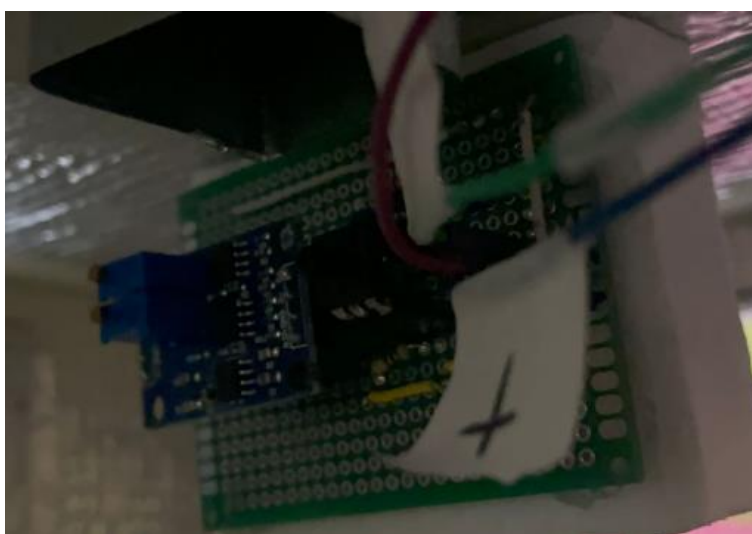


Ilustración 42. Sensor de presión en cuarto.

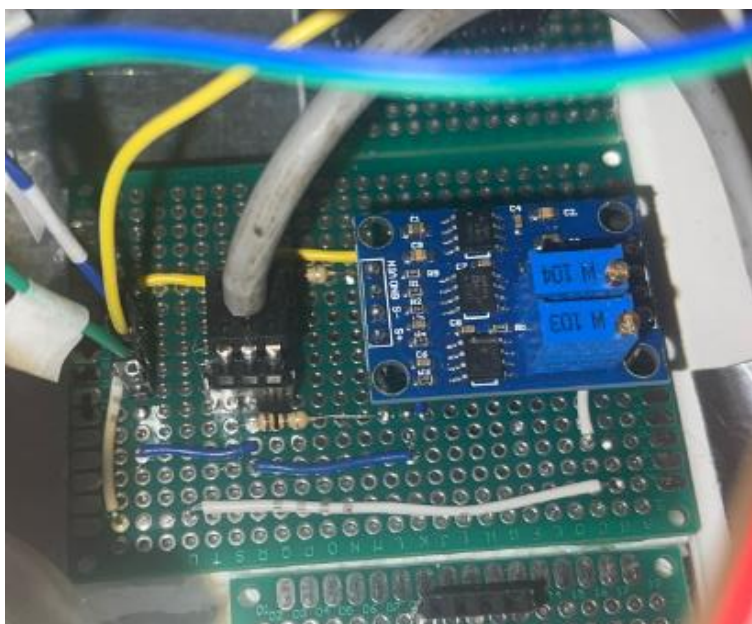


Ilustración 43. Sensor presión ambiente.

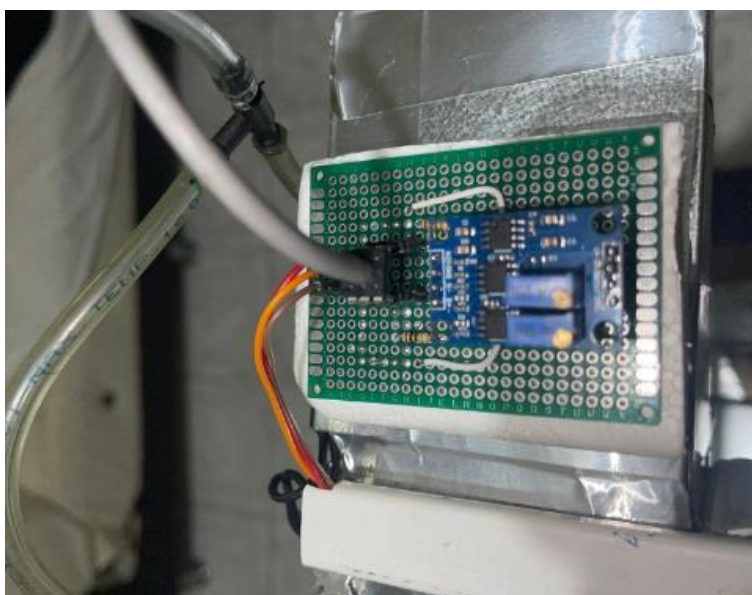


Ilustración 44. Sensor de presión en la salida de la UMA suministro.

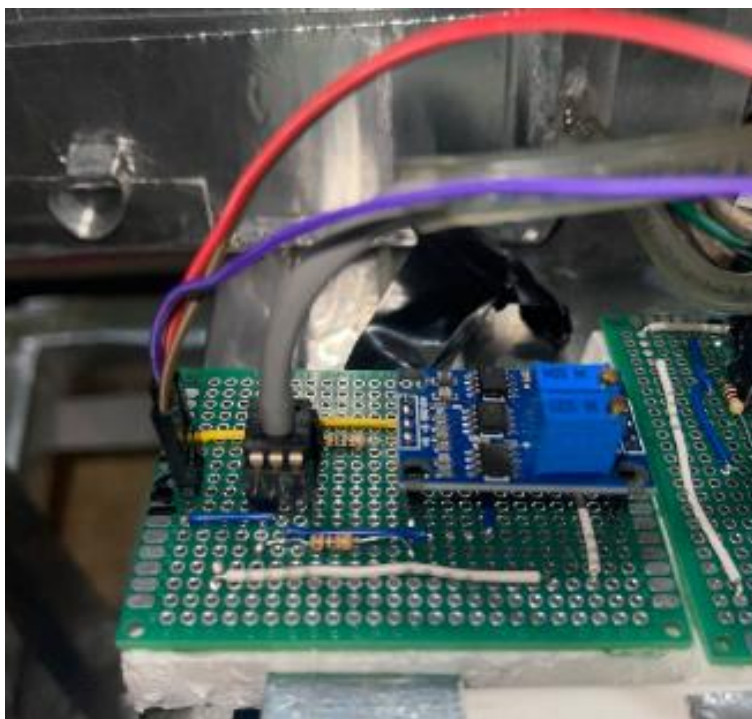


Ilustración 45. Sensor de presión en la entrada de la UMA suministro.

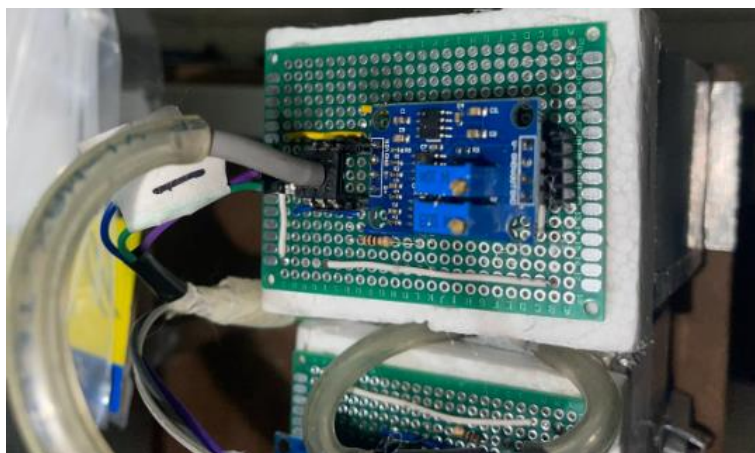


Ilustración 46. Sensor de presión en la salida de la UMA extracción.

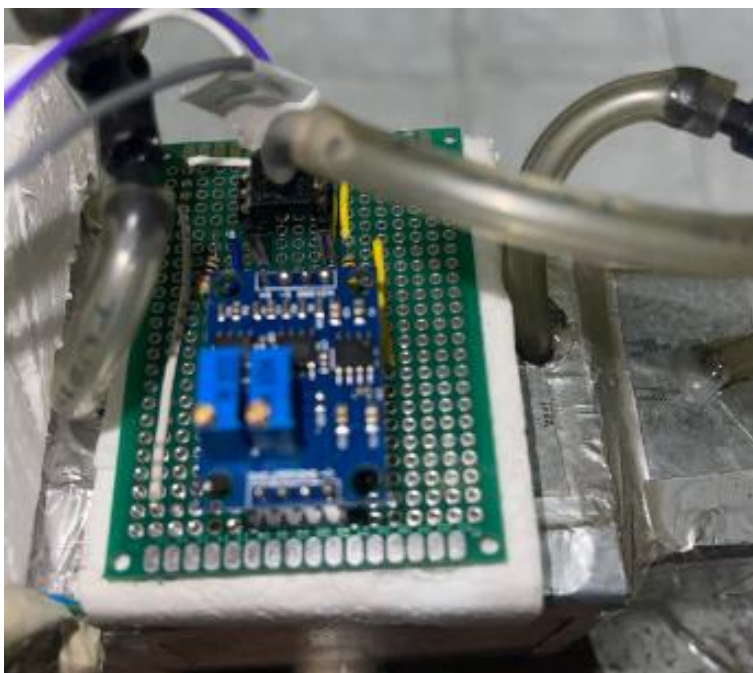


Ilustración 47. Sensor de presión en la entrada a de la UMA extracción.

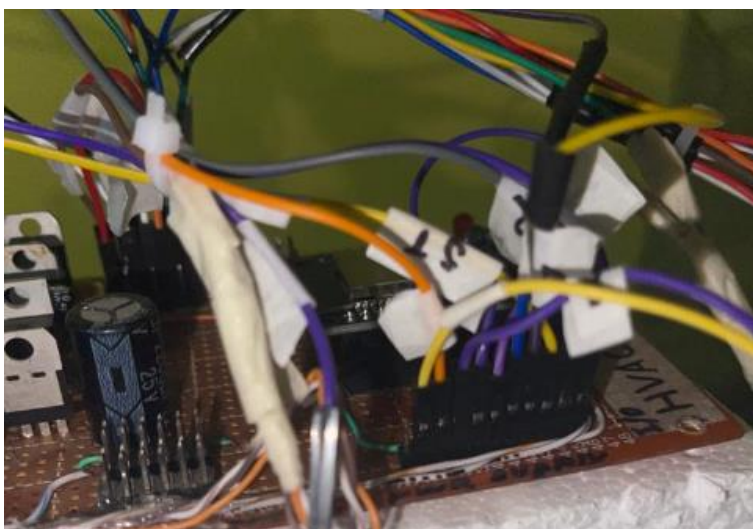


Ilustración 48. Pines conexión sensores.

8.4 Programación

Se realizó la programación del sistema en Virtual Studio, se definen las variables con el set point establecido de 25°C de temperatura y 25% de humedad relativa, los parámetros del modelo, se además se establece la comunicación con el pc y la plataforma de adafruit para visualización de variables en tiempo real. El programa se puede encontrar en el Anexo D.

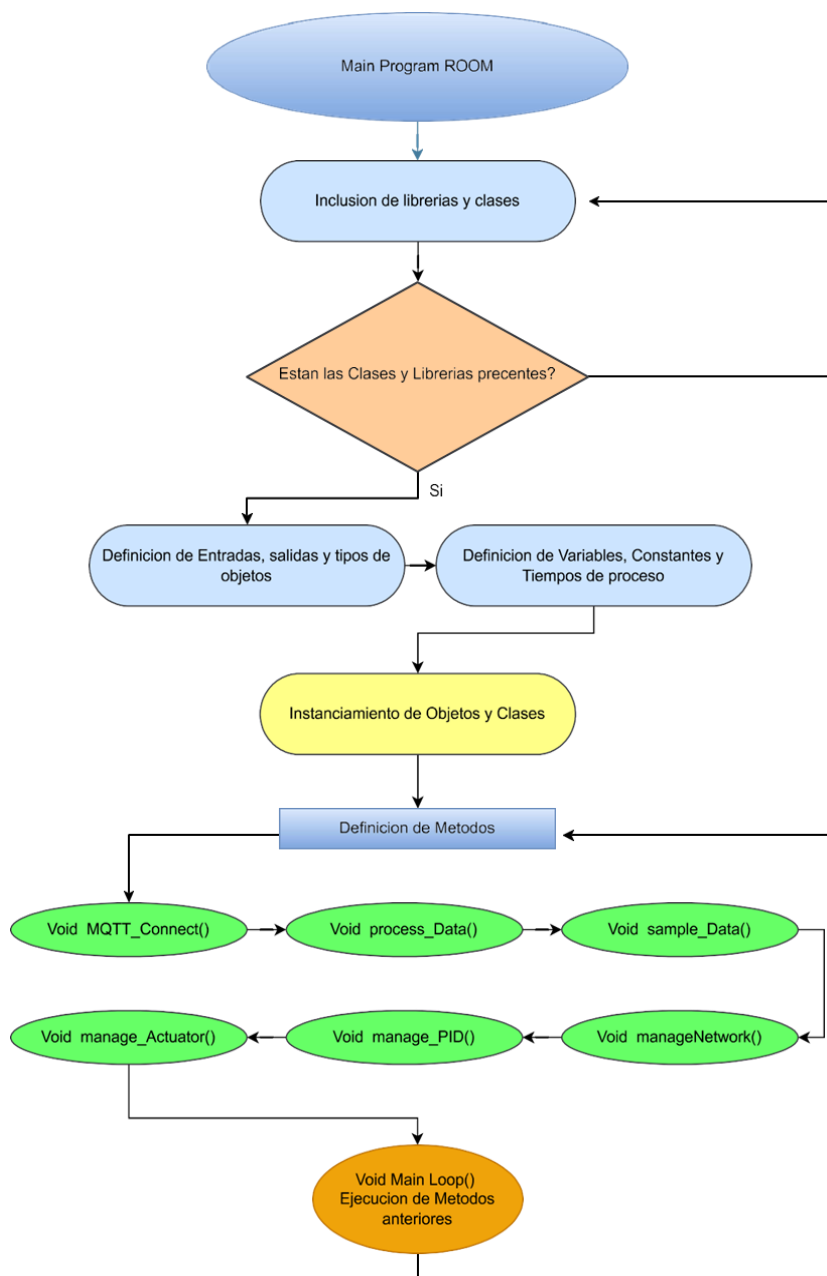


Ilustración 49. Programa principal.

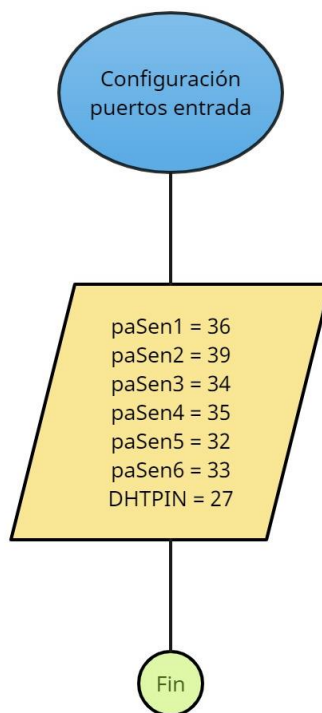


Ilustración 50. Configuración puertos de entrada.

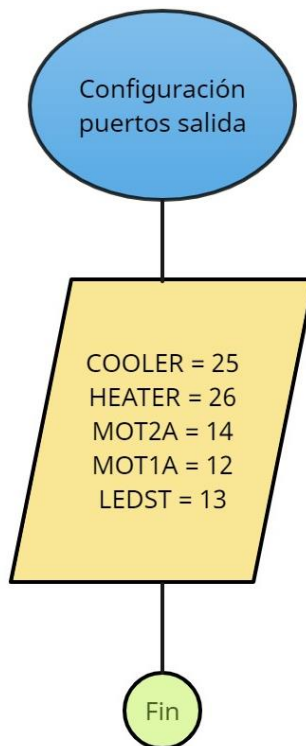


Ilustración 51. Configuración puertos de salida.

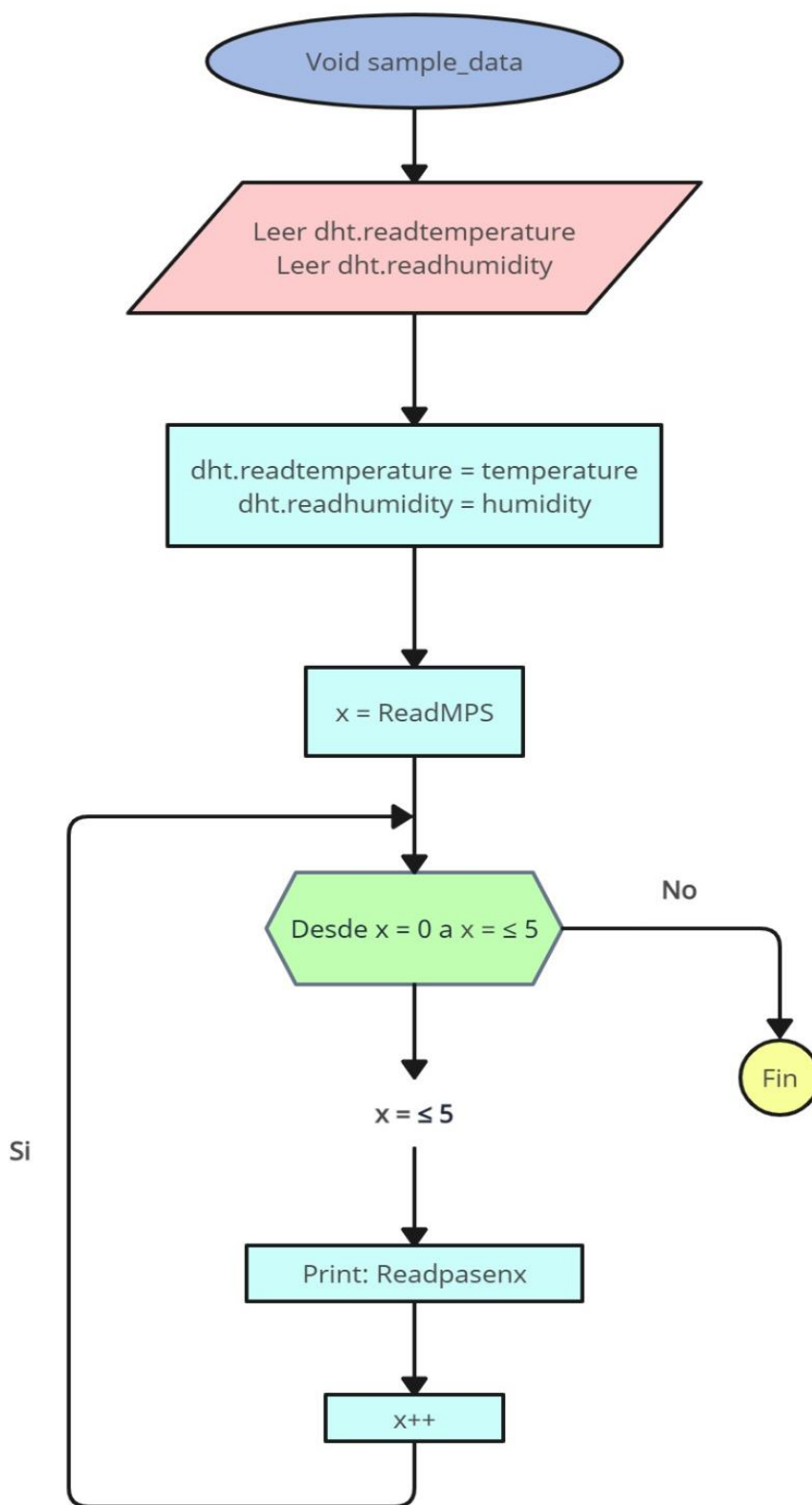


Ilustración 52. Void sample data.

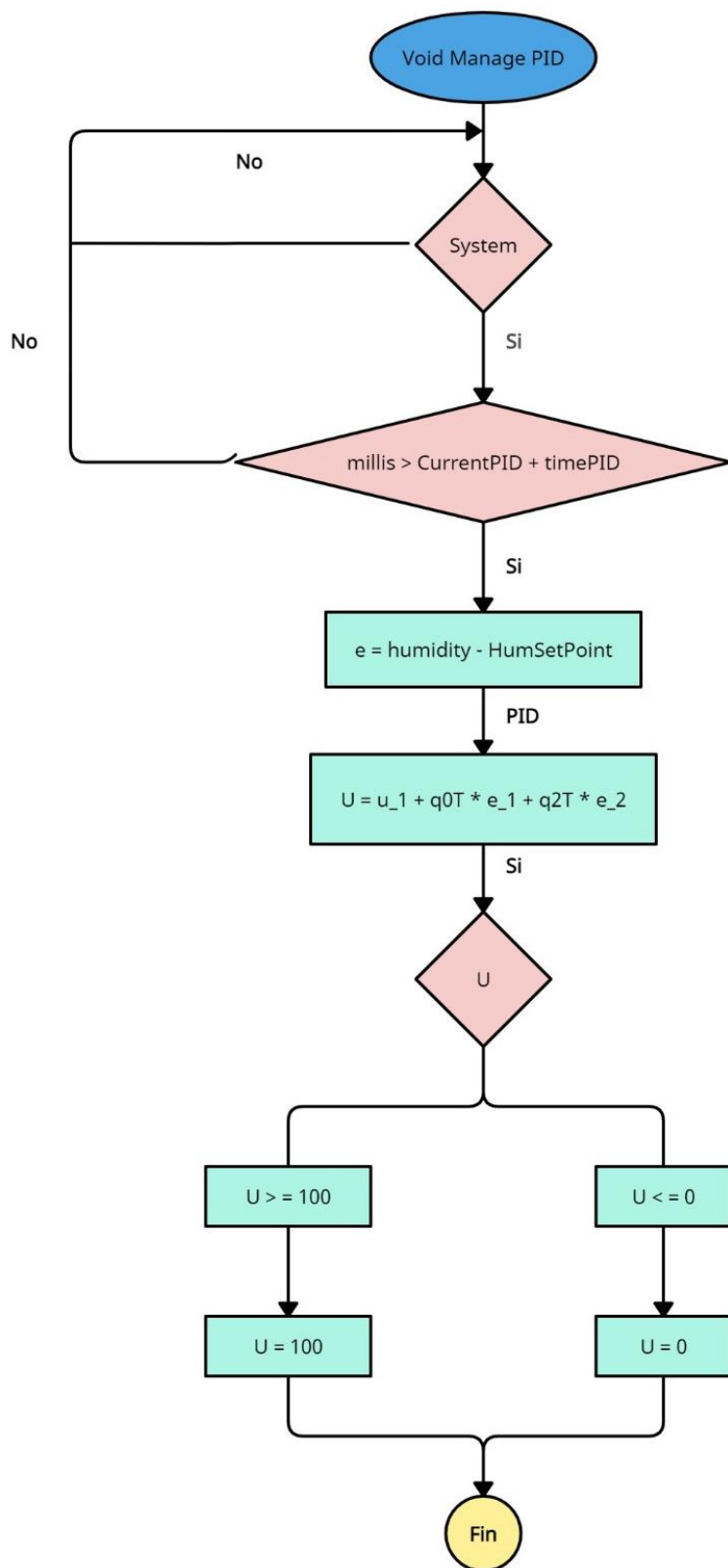


Ilustración 53. Void manage PID

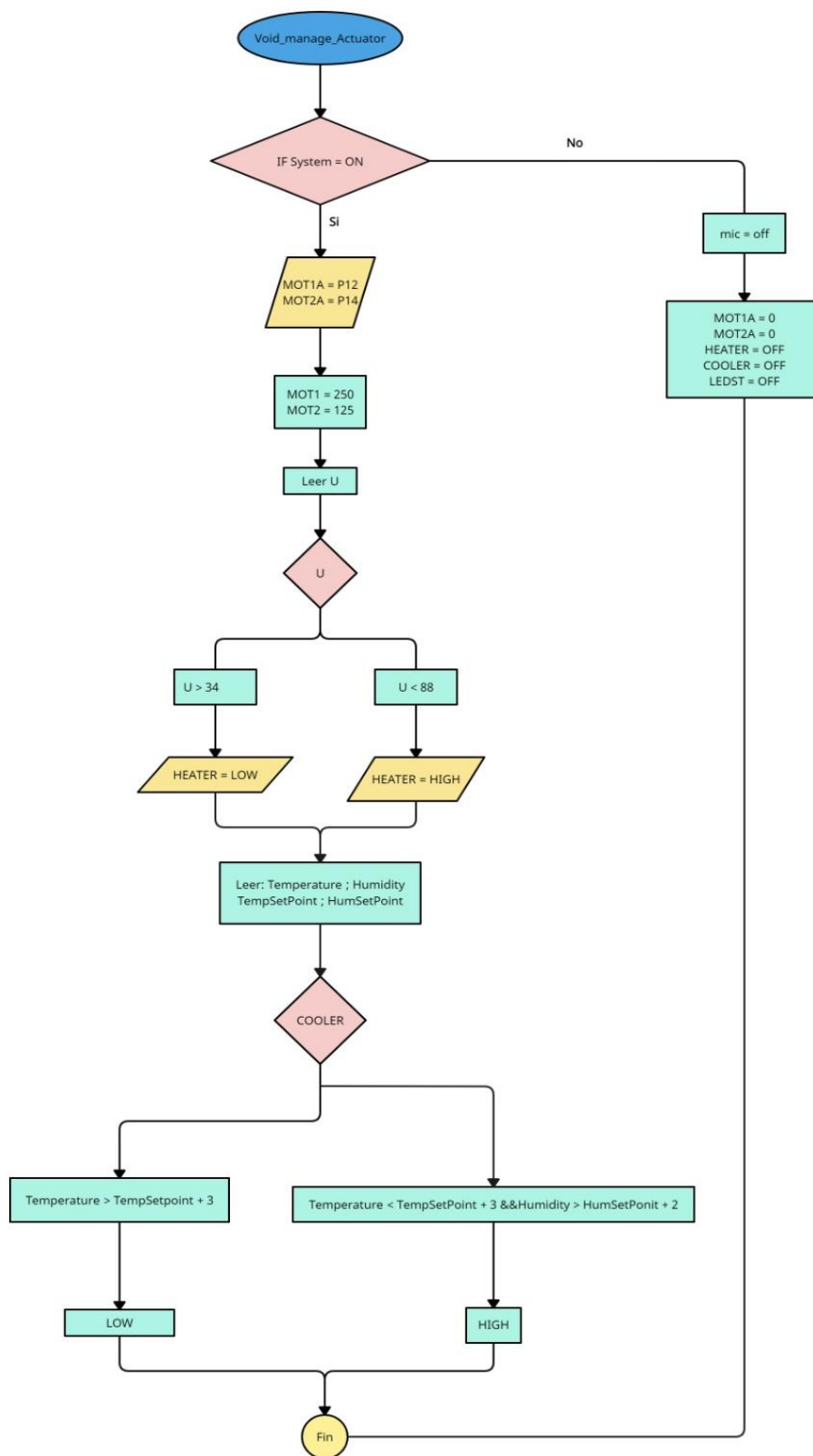


Ilustración 54. Void manage actuators.

8.5 Implementación

Se establece comunicación entre el prototipo y la *dashboard*, luego se visualizó el estado de cada variable en tiempo real en la plataforma adafruit, como se puede observar en la **¡Error!**

No se encuentra el origen de la referencia.

```

-----
2023/06/06 05:00AM State
Times:11,Temp:27.70,Hum:27.70,PaROOM:5401.40,DiffSumm:-17112.40,DiffExt:2031.50,Running:1,StateCode:0
2023/06/06 05:00AM State
Times:12,Temp:27.60,Hum:27.70,PaROOM:4803.90,DiffSumm:-16945.10,DiffExt:1027.70,Running:1,StateCode:0
2023/06/06 05:00AM State
Times:13,Temp:27.50,Hum:27.40,PaROOM:3824.00,DiffSumm:-16849.50,DiffExt:836.50,Running:1,StateCode:0
2023/06/06 05:00AM State
Times:14,Temp:27.40,Hum:27.90,PaROOM:4732.20,DiffSumm:-15587.58,DiffExt:979.90,Running:1,StateCode:0
2023/06/06 05:00AM State
Times:15,Temp:27.30,Hum:28.20,PaROOM:4397.59,DiffSumm:-15726.20,DiffExt:1171.10,Running:1,StateCode:0
2023/06/06 05:00AM State
Times:16,Temp:27.20,Hum:28.70,PaROOM:4660.50,DiffSumm:53751.10,DiffExt:1218.90,Running:1,StateCode:0
-----

```

Ilustración 55. Lectura de variables en tiempo real.

8.5.1 Grafica de variables

Con la base de datos obtenida en la plataforma, se extrae grafica en línea y observa el impulso y estabilización de las variables de temperatura y humedad.

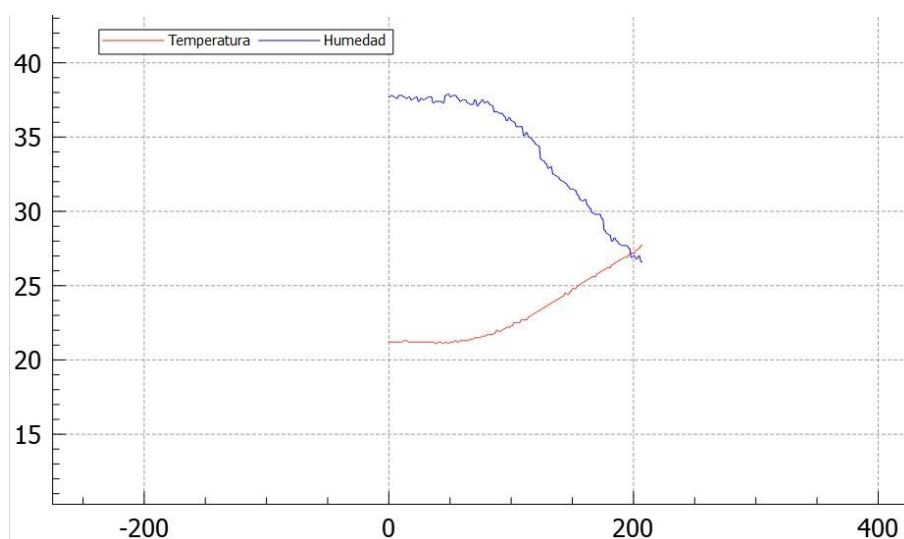


Ilustración 56. Gráfica1 temperatura y humedad

Se puede observar que el tiempo de impulso para que las dos variables se encuentren es de 200 segundos, con una humedad inicial de 38% y temperatura de 22°C.

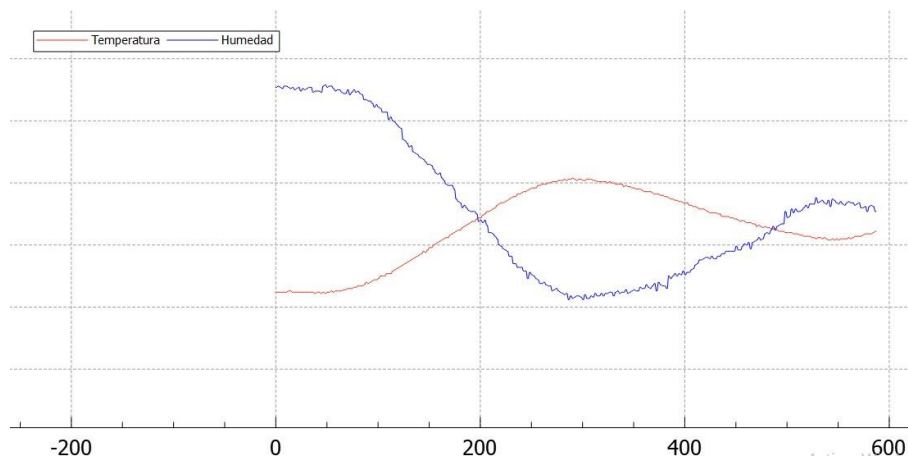


Ilustración 57. Gráfica2 temperatura y humedad

Después de transcurridos 600 segundos, el sistema comienza a estabilizarse gradualmente, logrando mantenerse dentro de los rangos permitidos. Sin embargo, se observa que empieza a oscilar entre esos límites establecidos, lo cual indica una respuesta dinámica del sistema en búsqueda de un equilibrio preciso. Este comportamiento oscilatorio es importante monitorear, estas fluctuaciones pueden garantizar un funcionamiento óptimo y estable a largo plazo.

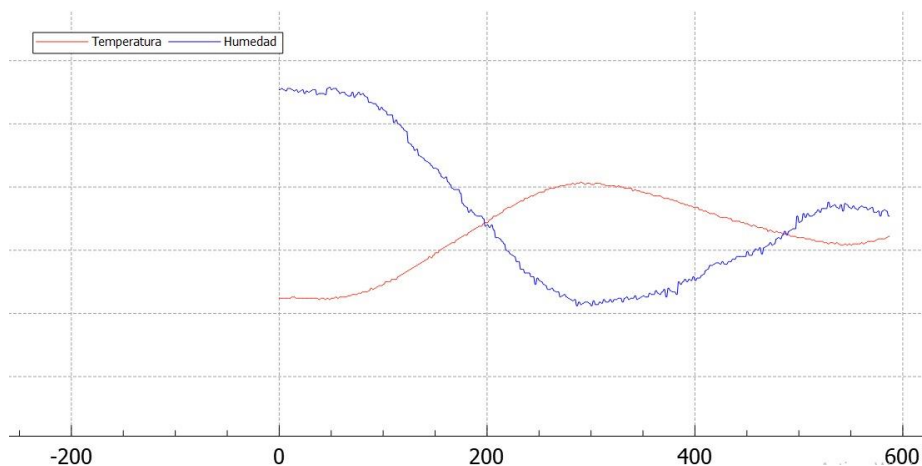


Ilustración 58. Gráfica3 temperatura y humedad.

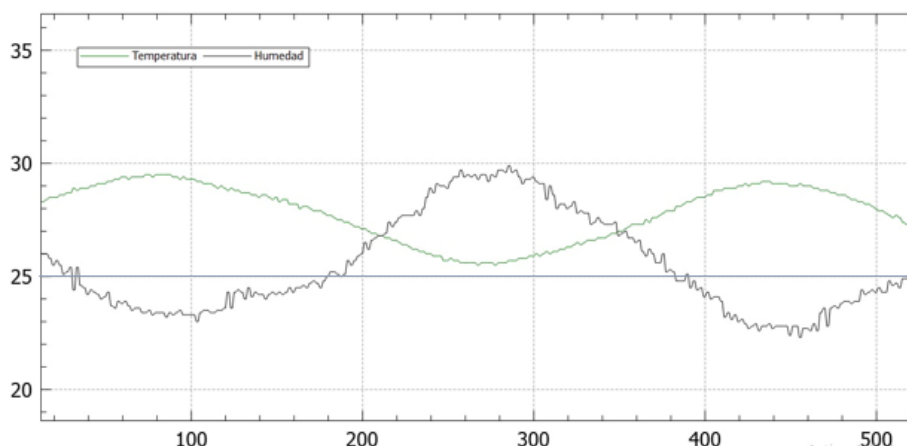


Ilustración 59. Datos con respecto al tiempo (humedad y temperatura) vs la señal de referencia.

Durante el proceso de graficación, se llevó a cabo una revisión de la lectura actual de los valores en la plataforma adafruit, la cual está enlazada con el sistema. Esta plataforma proporciona una interfaz que permite visualizar de manera precisa y actualizada las mediciones y datos registrados por el sistema en tiempo real. Al analizar estos valores, se pueden identificar patrones, tendencias o cambios significativos que son de vital importancia para comprender el comportamiento y rendimiento del sistema.

```

State
Times:51,Temp:28.40,Hum:24.70,
2023/06/03 12:06AM State
Times:52,Temp:28.60,Hum:24.50,
2023/06/03 12:06AM State
Times:53,Temp:28.90,Hum:23.50,
2023/06/03 12:06AM State
Times:54,Temp:29.10,Hum:23.20,
2023/06/03 12:06AM State
Times:55,Temp:29.20,Hum:23.20,
2023/06/03 12:06AM State
Times:56,Temp:29.30,Hum:22.90,
2023/06/03 12:06AM State
Times:57,Temp:29.60,Hum:22.60,

```

Ilustración 60. Datos de graficación 1.

```

State
Times:123,Temp:25.40,Hum:28.60
2023/06/03 12:12AM State
Times:124,Temp:25.40,Hum:28.30
2023/06/03 12:13AM State
Times:125,Temp:25.50,Hum:28.30
2023/06/03 12:13AM State
Times:126,Temp:25.50,Hum:28.40
2023/06/03 12:13AM State
Times:127,Temp:25.60,Hum:28.40
2023/06/03 12:13AM State
Times:128,Temp:25.70,Hum:28.30
2023/06/03 12:13AM State
Times:129,Temp:25.70,Hum:28.00

```

Ilustración 61. Datos de graficación 2.

```

2023/06/03 12:17AM State
Times:7,Temp:29.50,Hum:21.60,
2023/06/03 12:17AM State
Times:8,Temp:29.50,Hum:21.50,
2023/06/03 12:17AM State
Times:9,Temp:29.30,Hum:21.50,
2023/06/03 12:17AM State
Times:10,Temp:29.30,Hum:21.50,
2023/06/03 12:17AM State
Times:11,Temp:29.20,Hum:21.60,
2023/06/03 12:17AM State
Times:12,Temp:29.10,Hum:21.50

```

Ilustración 62. Datos de graficación 3.

8.6 Puesta a punto

Se llevan a cabo pruebas y se simulan fallos con el fin de evaluar los resultados, hacer las correcciones correspondientes y mejorar el rendimiento del prototipo. La tabla de fallas es la siguiente:

FALLAS POSIBLES EN EL SISTEMA	
Presion del cuarto fuera de rango	StateCode:10000
Temperatura fuera de rango	StateCode:1000
Humedad fuera de rango	StateCode: 100

Ilustración 63. Tabla de fallas.

8.6.1 Primera falla: Alta temperatura

Se coloca una fuente de calor al lado del sensor de temperatura para aumentar la variable considerablemente, de esta manera el sensor detecte un valor superior, el sistema detecta la falla e indica la alarma *state code*” =1000.

```

State
Times:54,Temp:31.00,Hum:31.50,PaROOM:119.50,DiffSumm:788.70,DiffExt:2772.40,Running:0,StateCode:1100
2023/06/03 02:52AM State
Times:55,Temp:31.30,Hum:31.40,PaROOM:788.70,DiffSumm:382.40,DiffExt:-1816.40,Running:0,StateCode:1100
2023/06/03 02:52AM State
Times:56,Temp:31.60,Hum:30.50,PaROOM:-143.40,DiffSumm:406.30,DiffExt:3154.80,Running:0,StateCode:1100
2023/06/03 02:52AM State
Times:57,Temp:31.80,Hum:30.40,PaROOM:-454.10,DiffSumm:167.30,DiffExt:4440.62,Running:0,StateCode:1100
2023/06/03 02:52AM State
Times:58,Temp:32.10,Hum:29.90,PaROOM:-215.10,DiffSumm:979.90,DiffExt:5090.70,Running:0,StateCode:1100
2023/06/03 02:52AM State
Times:59,Temp:32.40,Hum:29.80,PaROOM:645.30,DiffSumm:143.40,DiffExt:5090.70,Running:0,StateCode:1100
2023/06/03 02:53AM State
Times:60,Temp:32.60,Hum:29.90,PaROOM:-669.20,DiffSumm:-71.70,DiffExt:-645.30,Running:0,StateCode:1100

```

Ilustración 64. Falla 1.

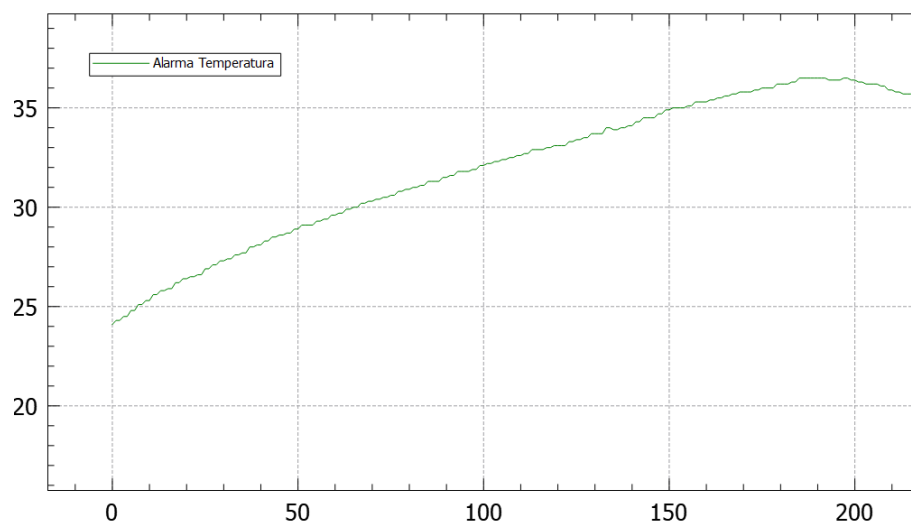


Ilustración 65. Grafica alarma 1.

8.6.2 Segunda falla: Humedad fuera de rango

Se deja aumentar el valor de humedad fuera del rango de set point, y verifica que de forma automática se genere la alarma que entro en fallo, con el “*state code*” =100.

```

2023/06/03 02:03AM State
Times:48,Temp:23.10,Hum:31.10,PaROOM:47.80,DiffSumm:-258.12,DiffExt:13642.12,Running:1,StateCode:100
2023/06/03 02:03AM State
Times:49,Temp:23.10,Hum:31.10,PaROOM:573.60,DiffSumm:-430.20,DiffExt:15391.60,Running:1,StateCode:100
2023/06/03 02:03AM State
Times:50,Temp:23.20,Hum:31.00,PaROOM:95.60,DiffSumm:430.20,DiffExt:14841.90,Running:1,StateCode:100
2023/06/03 02:03AM State
Times:51,Temp:23.20,Hum:31.00,PaROOM:430.20,DiffSumm:-478.00,DiffExt:18403.00,Running:1,StateCode:100
2023/06/03 02:03AM State
Times:52,Temp:23.30,Hum:31.00,PaROOM:191.20,DiffSumm:1123.30,DiffExt:16873.40,Running:1,StateCode:100

```

Ilustración 66. Falla 2.

9. Conclusiones

1. Se caracterizó y se diseñó un prototipo HVAC, especificando los valores requeridos para cada variable en el proceso y la ubicación determinada de los componentes, es fundamental tener en cuenta todos los factores que influirán en el correcto funcionamiento del sistema. Es importante considerar los requisitos específicos del ambiente, así como las normativas y estándares aplicables. Ya que un adecuado diseño del sistema HVAC permitirá una buena calidad del aire interior y un control efectivo.
2. Se realizó el diseño 3D y se generaron los planos de cada una de las partes del sistema en el programa inventor. se logró obtener una visión clara y precisa de cómo será la estructura y el funcionamiento del sistema. La generación de planos detallados de cada parte del sistema facilita la fabricación y el ensamblaje de los componentes, asegurándose de que el diseño se traduzca en un sistema funcional y efectivo.
3. Se ensamblo la estructura mecánica del prototipo y se realizó el montaje de la conexión eléctrica de acuerdo a las entradas y salidas del controlador, El ensamblaje de la estructura mecánica asegura un correcto funcionamiento del sistema, mientras que la conexión eléctrica garantiza una comunicación eficaz entre los componentes. Se ha puesto en práctica el diseño previamente realizado, y se han solventado posibles dificultades en el proceso de ensamblaje. En general, se ha cumplido con los objetivos establecidos para el desarrollo del prototipo, lo que permitirá avanzar en la fase de pruebas y optimización del sistema

4. Se diseñaron los lazos de control para las variables de temperatura y humedad, la selección adecuada de los elementos de control y la implementación de un lazo de control permiten mantener las variables en los valores adecuados, garantizando un correcto funcionamiento del proceso. Además, la monitorización constante de las variables y el ajuste continuo del sistema en función de cambios en el entorno, asegura la optimización del proceso y la reducción de costos. No se logra diseñar el lazo de control para la variable de presión diferencial debido al bajo caudal que se genera dentro de las unidades y el cuarto, lo cual afecta las lecturas de los sensores de presión ya que no se lograron estabilizar.
5. Se realizó la programación de microcontrolador ESP32 NodeMCU en Virtual Studio, se logró establecer una comunicación efectiva entre los sensores y el sistema de control. La programación adecuada del microcontrolador y la integración de los algoritmos de control permiten la monitorización de las variables y la toma de decisiones en tiempo real para mantener las condiciones adecuadas del ambiente. Además, la implementación de la programación permitirá el registro de datos importantes relacionados con el rendimiento del sistema.
6. Se simularon las 2 fallas (alta - baja temperatura o humedad), se ha comprobado la eficiencia y efectividad del sistema de control basado en los lazos diseñados previamente para las variables. La simulación de estas fallas permite evaluar el comportamiento del prototipo en situaciones críticas y determinar la capacidad del sistema de control para mantener las condiciones adecuadas en todo momento. La evaluación del desempeño del prototipo y la verificación constante de las variables es fundamental para garantizar el

correcto funcionamiento del sistema. La falla de presión diferencial no se puede simular debido a que no se logró estabilizar la lectura de los sensores de presión.

10. Recomendaciones

Se recomienda hacer el prototipo en una escala más grande. Al aumentar la escala del prototipo, se pueden reducir los efectos de las condiciones o perturbaciones externas que puedan afectar las variables y, al mismo tiempo, tener un mejor control sobre el proceso de desarrollo.

A menudo, cuando se trabaja en una escala pequeña, las condiciones y perturbaciones externas pueden tener un gran impacto en las variables, lo que puede dificultar el control del proceso y hacer que los resultados sean menos confiables. Al aumentar la escala del prototipo, se pueden reducir estos efectos y tener una mayor precisión en los resultados obtenidos. Además, trabajar en una escala más grande puede permitir una mejor visualización del prototipo y una mayor facilidad en la identificación de posibles problemas o áreas de mejora.

11. Bibliografía

- [A. J. Esquivel, «Sistemas críticos HVAC en la industria farmacéutica,» 2022. [En línea].
1 Available: [https://www.mundohvacr.com.mx/2014/02/sistemas-criticos-hvac-en-la-industria-](https://www.mundohvacr.com.mx/2014/02/sistemas-criticos-hvac-en-la-industria-farmaceutica/)
] [farmaceutica/](https://www.mundohvacr.com.mx/2014/02/sistemas-criticos-hvac-en-la-industria-farmaceutica/).
- [J. G. A. M. G. R. E. P. W. U. Sabogal Rodríguez, Artist, *Propuesta de un sistema HVAC*
2 *para área de cremas en el laboratorio farmacéutico Eurofarma Colombia*. [Art]. Universidad
] Piloto de Colombia, 2018.
- [«Educación,» Beeter Life, [En línea]. Available:
3 <https://www.oecdbetterlifeindex.org/es/topics/education-es/>.
]
- [E. Berra, J. Cuautle y M. Perez, «Método de enseñanza – aprendizaje en la educación
4 superior para promover la innovación a través del desarrollo de prototipos.» Marzo 2018.
] [En línea]. Available:
[https://www.researchgate.net/publication/323704173_Metodo_de_ensenanza_-
_aprendizaje_en_la_educacion_superior_para_promover_la_innovacion_a_traves_del_desarr
ollo_de_prototipos](https://www.researchgate.net/publication/323704173_Metodo_de_ensenanza_-_aprendizaje_en_la_educacion_superior_para_promover_la_innovacion_a_traves_del_desarrollo_de_prototipos).
- [W. M. PIZCO LOJA y . G. I. CASTILLO SALINAS, «TRABAJO DE TITULACIÓN DE
5 GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL,» Octubre 2019. [En línea]. Available:
] [https://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/5008/2/INCIDENCIAS%20DE%20LO
S%20PROTOTIPOS%20DID%20C3%81CTICOS%20PARA%20EL%20DESARROLLO%20.
pdf](https://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/5008/2/INCIDENCIAS%20DE%20LOS%20PROTOTIPOS%20DID%20C3%81CTICOS%20PARA%20EL%20DESARROLLO%20.pdf).
- [H. Scientific, «El capítulo <1079> de la USP describe buenas prácticas de envío y
6 almacenamiento de medicamentos,» Abril 2019. [En línea]. Available:
] [https://www.helmerinc.com/sites/default/files/2019-05/WP-USP-Chapter-1079-Outlines-
Good-Drug-Storage-and-Shipping-Practices-S3R026.pdf](https://www.helmerinc.com/sites/default/files/2019-05/WP-USP-Chapter-1079-Outlines-Good-Drug-Storage-and-Shipping-Practices-S3R026.pdf).
- [«Isobox Systems – Salas blancas Logo,» 2019. [En línea]. Available:
7 <https://www.isoboxsystems.com/el-futuro-proximo-del-hvac-en-la-industria-farmaceutica/>.
]
- [D. R. Cabezas Félix, Artist, *Diseño y análisis energético-psicrométrico de un nuevo sistema*
8 *de ventilación y acondicionamiento de aire del área de microbiología y zona estéril de una*
] *empresa farmacéutica en la ciudad de Quito, Distrito Metropolitano*. [Art]. Escuela
Politécnica Nacional, 2019.

[Y. A. ÇENGEL y M. A. BOLES, TERMODINÁMICA OCTAVA EDICIÓN, CIUDAD DE
9 MEXICO: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2015.

]

[R. M. M. Karl Johan °Aström, Feedback Systems An Introduction for Scientists and
1 Engineers, Oxford: Princeton Univeristy Press., 2009.

0

]

[*SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS*. [Art]. Universidad Tecnologica de Pereira, 2011.

1

1

]

[G. Torres, «Sistemas de control de movimiento,» 05 Noviembre 2021. [En línea]. Available:
1 <https://cl.urany.net/blog/sistemas-de-control>.

2

]

[«Tipos de control (lazo abierto y cerrado),» [En línea]. Available:

1 <https://sites.google.com/site/03fmeautomatismos/home/tipos-control>. [Último acceso: Abril
3 2023].

]

[Raul, «¿Qué es el control PID? Comprenda cómo funciona y vea ejemplos,» [En línea].

1 Available: <https://www.west-cs.com.br/blog/es/2017/03/12/o-que-e-control-pid/>. [Último
4 acceso: Marzo 2023].

]

[«CONTROLADOR PID PARA EL PLC,» [En línea]. Available:

1 <http://www.slicetex.com.ar/docs/an/an033/index.php>. [Último acceso: Abril 2023].

5

]

[«Teoría PID explicada,» [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-co/shop/labview/pid-theory-explained.html>. [Último acceso: Marzo 2023].

6

]

[K. Ogata, Ingeniería de control moderna, madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2010.

1

7

]

[«Instrumentación Industrial: todo lo que necesitas saber,» Centro de formación técnica para la industria, [En línea]. Available: <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-instrumentacion-industrial/>. [Último acceso: 2023].

]

[«¿Qué es un sistema HVAC?,» Gometrics, [En línea]. Available: <https://www.gometrics.net/sistemas-hvac/#:~:text=Hay%20nueve%20partes%20en%20un,las%20bobinas%20y%20el%20soplador..>

]

[T. Farmer, «Fine Homebuilding,» Noviembre 2022. [En línea]. Available: Designing an HVAC System for a Passive House.

0

]

[«Manual para la Instalación, Operación y Mantenimiento de Sistemas de Filtración de Aire,» LUFTECHNIK, 19 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.luftechnik.com/aire-acondicionado/que-es-y-como-funciona-la-filtracion-del-aire/>.

]

[«Manual básico de pruebas del NodeMCU,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.puntoflotante.net/MANUAL-BASICO-NODEMCU-ESP32-ARDUINO.pdf>.

2

2

]

[«¿Qué es la clasificación de salas limpias ISO 8?,» IsoBox System sl, [En línea]. Available: <https://www.iso-boxsystems.com/que-es-la-clasificacion-de-salas-limpias-iso-8/>. [Último acceso: 2023].

]

[WHO, «WHO EXPERT COMMITTEE ON SPECIFICATIONS FOR PHARMACEUTICAL PREPARATIONS Forty-fifth report,» 2011. [En línea]. Available:

[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44079/WHO_TRS_961_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44079/WHO_TRS_961_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y&ua=1)

]

[M. D. S. Y. P. SOCIAL, 06 Abril 2016. [En línea]. Available:

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-1160-2016.pdf>.

]

[J. C. Castaño y C. A. Orozco, Artists, *METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE CUARTOS LIMPIOS*. [Art]. Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.

6

]

[U. d. Alcalá, «Sistemas de control en tiempo discreto,» [En línea]. Available:
2 [https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/210921185900-Tema2_RDII_2014-](https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/210921185900-Tema2_RDII_2014-7)
7 15.pdf. [Último acceso: Febrero 2023].

]

[*Energía eléctrica: conceptos y principios básicos.* [Art]. Tecnológico de Monterrey.

2

8

]

[E. F. C. Chala, «Puente de Wheatstone,» 21 02 2020. [En línea]. Available:

2 <https://www.vistronica.com/blog/post/puente-de-wheatstone-.html>.

9

]

[«Disposición del Puente de Wheatstone,» 09 Octubre 2007. [En línea]. Available:

3 https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone#/media/Archivo:Wheatstonebridge.svg.

0

]

[O. Planas, «Ejemplos de temperatura en el día a día,» 06 Octubre 2021. [En línea]. Available:

3 <https://solar-energia.net/termodinamica/propiedades-termodinamicas/temperatura/ejemplos>.

1

]

[«Importancia de la Medición de Temperatura Durante el Transporte de Medicamentos,» [En
3 línea]. Available: [https://www.akribis.info/web/importancia-de-la-medicion-de-temperatura-](https://www.akribis.info/web/importancia-de-la-medicion-de-temperatura-durante-el-transporte-de-medicamentos/)
2 [durante-el-transporte-de-medicamentos/](https://www.akribis.info/web/importancia-de-la-medicion-de-temperatura-durante-el-transporte-de-medicamentos/). [Último acceso: Marzo 2023].

]

[«Velocidad,» [En línea]. Available: <https://conceptodefinicion.de/velocidad/>. [Último acceso:
3 Marzo 2023].

3

]

[«Humedad relativa y humedad absoluta: diferencias,» Sensor de humedad, tu aliado para
3 combatir el vapor de agua en el air, 2016. [En línea]. Available:

4 <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/sensor-humedad/>.

]

[«Sensor de humedad, tu aliado para combatir el vapor de agua en el aire,» Siber Ventilación,
3 2016. [En línea]. Available: [https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/sensor-](https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/sensor-humedad/)
5 [humedad/](https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/sensor-humedad/).

]

[«Presión diferencial,» mundocompresor, [En línea]. Available:
3 <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/presion-diferencial>.

6

]

[«Unitary HVAC Equipment,» Pacific Northwest National Laboratory, Diciembre 2020. [En
3 línea]. Available: <https://www.pnnl.gov/projects/om-best-practices/unitary-hvac-equipment>.

7

]