



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERIA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS

Trabajo Terminal II

Sistema regulador automático de nivel de pH y
conductividad en la mezcla de nutrientes para riego
de lechuga hidropónica

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presentan:

Guerrero Jasso Mariana

Martínez Venegas Mitzi Fernanda

Romero Sánchez Ximena

Asesores:

Dr. Alberto Hernández Pérez

Dra. Blanca Tovar Corona



Diciembre 2021



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERIA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS

Trabajo Terminal II

Sistema regulador automático de nivel de pH y
conductividad en la mezcla de nutrientes para riego
de lechuga hidropónica

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

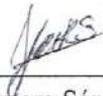
Presentan:



Guerrero Jasso Mariana



Martínez Venegas Mitzi Fernanda



Romero Sánchez Ximena

Asesores:



Dr. Alberto Hernández Pérez



Dra. Blanca Tovar Corona

Presidente del Jurado



Dra. Norma Lozada Castillo

Profesor Titular



M. en E. Rivas Bonilla Elizabeth





Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

Presente

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Mariana Guerrero Jasso
(se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada Sistema regulador automático de nivel de pH y conductividad en la mezcla de nutrientes para riego de lechuga hidropónica
_____, en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA "La Tesis" por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis". Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 3 de mayo de 2022

Atentamente



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

Presente

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Mitzi Fernanda Martínez Venegas (se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada Sistema regulador automático de nivel de pH y conductividad en la mezcla de nutrientes para riego de lechuga hidropónica, en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA "La Tesis" por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis". Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 3 de mayo de 2022

Atentamente

Agradecimientos

Guerrero Jasso Mariana

En primer instancia agradecer a los docentes que me han acompañado a lo largo de mi vida académica, de quienes aprendí de la vida y lo académico. Destacando la ayuda de la Dra. Blanca Tovar y al Dr. Alberto Hernández, así como la del Sr. Juan Martínez quien nos brindó su conocimiento de hidroponía e hizo posible este proyecto.

En segunda agradezco a mis amigos, ustedes me han brindado su apoyo y ayuda incondicional en especial en los momentos más difíciles de mi vida; confiando y creyendo más en mí de lo que a veces yo lo hacía. A Karime por confiar en mí y enseñarme que “con todo menos con miedo y si lo tenemos pues con todo y miedo”, a Cassandra e Iridian por siempre estar ahí, en las buenas y en las malas. A Luis Vera y Carlos Almazán por hacerme reír y apoyarme como nadie más; y a los demás, ustedes saben quiénes son y el cariño inmenso que les tengo, sin ustedes no estaría redactando esto. A mi equipo de trabajo por tenerme la confianza para ser parte de esto y juntas ser un equipo unido, divertido y que logra cosas increíbles.

Por último, a las personas más importantes en mi vida. A mi mamá por enseñarme disciplina y brindarme todo su amor y apoyo incondicional en todo lo que quisiera hacer. A mi hermana por abrirme camino y por impulsarme a ser mejor. Y en especial a mi papá, por ser mi confidente, por dejarme ser quien era, por salvarme cuando estaba en apuros, por despertar en mí la pasión por la ingeniería. Nunca me pusiste límites pues el mundo ya tiene suficientes. Y a toda mi familia que me apoya y está ahí para levantarme si caigo y también para festejar mis logros.

Martínez Venegas Mitzi Fernanda

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional por acogerme en sus instalaciones durante mi desarrollo como estudiante en el nivel medio superior y superior, así mismo por haberme ofrecido el espacio y oportunidades maravillosas donde conocí a personas, amigos y profesores que formaron parte de mi crecimiento personal y profesional.

A la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas por forjarme como Ingeniera brindándome los recursos necesarios para enfrentar los constantes retos académicos y profesionales.

A nuestros asesores, la Dra. Blanca Tovar y el Dr. Alberto Hernández, quienes nos dedicaron parte de su tiempo, nos brindaron su apoyo y compartieron con nosotros su conocimiento.

Al Sr. Juan Martínez, de quien aprendimos sobre el proceso y las dificultades existentes en los huertos de lechuga hidropónica, aspectos clave para el presente trabajo.

A mis compañeras de Trabajo Terminal, Mariana y Ximena, por su dedicación y esfuerzo durante el desarrollo de este.

Me siento muy feliz y afortunada de poder culminar esta etapa de mi vida, no hubiera sido posible sin el apoyo y amor incondicional por parte de mi familia.

Me gustaría extender mi más profundo agradecimiento a mi mamá, Marina Venegas, por acompañarme desde el inicio de este sueño y en especial por enseñarme a trabajar con constancia y disciplina. A mi hermana, Maritza Martínez, por ser mi inspiración, y a mi papá, Manuel Martínez, por compartir conmigo su vocación y ser mi ejemplo de perseverancia, autenticidad y pasión.

A mis amigos, Fernanda De Luna, Jesica González, Jesús Montiel, Néstor Valdez, Nahomi Canizal y Sebastián Maya, por estar conmigo en los altibajos del camino, alentándome en todo momento. Infinitas gracias por permitirme ser su amiga.

Romero Sánchez Ximena

A mi familia que me han otorgado incansablemente todo aquello de lo que carecieron, siendo mi ejemplo de perseverancia, trabajo y amor, sin cuyo apoyo este logro no sería posible.

A compañeros y amigos que me acompañaron y apoyaron en las complicaciones y los retos encontrados durante toda la trayectoria académica, con quienes puedo compartir conocimiento aspiraciones y esperanzas. Particularmente a Luis Morales Vera y a Carlos Almazán, quienes nos regalaron su tiempo y consejo durante el desarrollo de este proyecto.

A todos los maestros que nos guiaron directa o indirectamente, quienes hacen de la enseñanza una vocación, y nos inspiran con su ejemplo, especialmente a la Dra. Blanca Tovar y al Dr. Alberto Hernández que particularmente nos brindaron su consejo y experiencia para este proyecto.

Por último, pero no menos importante, al Sr. Juan Martínez, quien generosamente nos abrió las puertas de su negocio y nos orientó sobre el proceso hidropónico y sus dificultades.

Índice General

Agradecimientos	6
I. Resumen	12
II. Abstract.....	12
III. Índice de figuras	13
IV. Índice de tablas	18
Lista de abreviaturas	24
Simbología.....	25
Introducción.....	26
Enfoque Mecatrónico.....	27
Definición del problema	28
Justificación	32
Objetivos.....	33
Antecedentes.....	34
Organización del documento	39
Capítulo 1. Marco de Referencia.....	40
1.1 Marco conceptual	40
1.1.1 Hidroponía.....	40
1.1.2 Solución Nutritiva	41
1.1.3 Conductividad Eléctrica (CE)	41
1.1.4 Potencial de Hidrógeno (pH)	42
1.2 Marco teórico	43
1.2.1 Mecánica de Fluidos [21]	43
1.2.2 Sistema de control difuso	45
1.3 Marco procedimental	47
1.3.1 Metodología	47
1.3.2 Despliegue de la función de calidad QFD	48
1.3.3 Herramienta multicriterio AHP	48
1.3.4 Selección de materiales	49

1.3.5 Selección de procesos	49
1.3.6 Análisis de elemento finito.....	50
Capítulo 2. Diseño del sistema.....	52
2.1 Diseño conceptual	52
2.1.1 Necesidades y requerimientos	52
2.1.2 Arquitectura del sistema.....	58
2.1.3 Concepto solución.....	72
2.2 Diseño de dominio específico	84
2.2.1 (S4) Sistema estructural.....	84
2.2.2 (S1) Sistema de manejo de solución.....	104
2.2.3 (S3) Sistema de información	120
2.2.4 (S2) Sistema energético.....	143
2.2.5 (M6) Interfaz Gráfica	150
2.3 Integración del sistema.....	161
2.3.1 Integración del Hardware	161
2.3.2 Integración del Software.....	171
Capítulo 3. Implementación del sistema.....	177
3.1 (S4) Sistema estructural	177
3.1.1 Sistema hidropónico.....	177
3.1.2 Caja de protección de componentes.....	179
3.2 (S1) Sistema de manejo de solución	180
3.2.1 Implementación del módulo de flujo de solución (M1).....	180
3.2.2 Implementación del módulo de concentrado de solución (M2)	182
3.3 (S3) Sistema de Información	186
3.3.1 Implementación del módulo de medición (M3).....	186
3.3.2 Verificación del módulo 3	187
3.3.3 Implementación del módulo de procesamiento (M4).....	190
3.3.4 Verificación.....	191
3.3.5 Implementación del módulo de comunicación (M5)	192
3.4 (S2) Sistema energético	195

3.4.1 Implementación	195
3.4.2 Verificación.....	196
3.5 (M6) Interfaz Gráfica.....	199
3.5.1 Implementación	199
3.5.2 Verificación.....	200
3.6 Integración del sistema estructural completo (S1, S2, S3 y S4)	203
3.6.1 Verificación.....	203
Capítulo 4. Análisis de resultados	209
4.1 Análisis de Ingeniería.....	209
4.1.1 Resultados globales	209
4.2 Análisis de costos	212
4.2.1 Costos de componentes con compra en línea	212
4.2.2 Costos de componentes con compra presencial.....	213
4.2.3 Costos de impresión 3D y corte láser.....	215
4.2.4 Costos de traslados.....	216
4.2.5 Costos por servicios	216
4.2.6 Costos totales	216
Conclusiones.....	218
Recomendaciones y trabajo a futuro.....	220
Apéndices.....	220
A. Diseño del sistema	220
A.1 Matriz binaria de criterios.....	220
B. Diseño de dominio específico (Validación).....	222
B.1 S3 Sistema de información	222
B.1.2 Reglas difusas	232
B.2 S4 Sistema Estructural	233
B.3 S1 Sistema de manejo de solución.....	235
B.4 S1 Sistema Energético	238
B.5 Características de las propuestas de solución.....	239
B.6 Análisis de elemento finito	239

B.7 Diagramas de flujo del código.....	242
B.8 Características de los componentes utilizados	245
C. Implementación.....	251
C.1 Diagrama electrónico.....	251
D. Diseño de PCBS	251
E. Planos de manufactura.....	253
Bibliografía	261

I. Resumen

En el presente trabajo se lleva a cabo el diseño y la construcción de un sistema regulador automático de nivel de pH y conductividad eléctrica en la mezcla de nutrientes para riego de un sistema de cultivo por la técnica NFT de lechuga hidropónica. Mantener un nivel de concentración de nutrientes y de agua en la solución nutritiva de riego de estos cultivos favorece un crecimiento saludable de los mismos, pero al ser esta una técnica donde la solución de riego recircula, la absorción de nutrientes o de agua de la planta ocasiona variaciones en la concentración, de modo que aquí se presenta el diseño y la implementación de un sistema de control difuso capaz de regular pH y conductividad eléctrica en un contenedor de 60 L, dentro de los rangos de 6 a 6.5 de pH y 1.4 a 1.7 mS/cm respectivamente, pues estos niveles están asociados con una concentración aceptable en la solución nutritiva mediante la adición de agua o concentrado de nutrientes. Enviando también las mediciones obtenidas por los sensores de pH, CE y un sensor de temperatura y humedad ambiental a una interfaz alojada en un servidor web para su visualización. Para este prototipo se considera una estructura hidropónica de 2 niveles con capacidad de cultivo de 22 lechugas cuyas dimensiones son 1.1 m de altura y de largo por 0.45 m de ancho.

Palabras clave: lechuga hidropónica, NFT, control, conductividad, interfaz, pH.

II. Abstract

The design and construction of an automatic regulating system of the pH level and electrical conductivity in the nutrient mixture for irrigation of a hydroponic lettuce cultivation system using the NFT technique is presented in this document. Maintaining a level of concentration of nutrients and water in the nutrient solution for irrigation of these crops favors their healthy growth, but as this is a cultivation technique where the irrigation solution recirculates, the absorption of nutrients or water from the plant causes variations in the concentration, so here we present the design and implementation of a fuzzy control system capable of regulating pH and electrical conductivity in a 60 L container, within the ranges of 6 to 6.5 pH and 1.4 to 1.7 mS/cm respectively, as these levels are associated with an acceptable concentration in the nutrient solution through the addition of water or nutrient concentrate. Sending also the measurements obtained by the pH, EC sensors and a temperature and humidity sensor to an interface hosted on a web server for visualization. For this prototype a hydroponic structure of 2 levels is considered with a capacity of 22 lettuce plants with dimensions of 1.1 m in height and length by 0.45 m in width.

Keywords: hydroponic, NFT, control, electrical conductivity, interface, pH

III. Índice de figuras

Figura 1 Distribución actual de los cultivos hidropónicos NFT del productor local	28
Figura 2 Contenedores de solución nutritiva y agua.	29
Figura 3 Obtención de muestra de la solución nutritiva para riego.....	29
Figura 4 Medición de pH de la solución nutritiva para riego.....	29
Figura 5 Medición de la CE de la solución nutritiva para riego.....	30
Figura 6 Problemas de desarrollo en las lechugas.....	31
Figura 7 Buen desarrollo de las lechugas	31
Figura 8 Conjunto de técnicas hidropónicas	40
Figura 9 Esquema básico de funcionamiento de la técnica por película nutritiva..	41
Figura 10 Diagrama a bloques de un sistema de control difuso simple	46
Figura 11 Esquema de la metodología V aplicada al presente trabajo	48
Figura 12 Tensor de tensión (izquierda) y sus principales valores normales [28] .	51
Figura 13 Escalas para el QFD	56
Figura 14 Despliegue de la función de calidad QFD	57
Figura 15 Arquitectura funcional.....	61
Figura 16 A0 como función.....	67
Figura 17 A0 expandido	68
Figura 18 Arquitectura Física	70
Figura 19 Boceto primera propuesta (C1)	76
Figura 20 Boceto segunda propuesta (C2)	78
Figura 21 Boceto Tercera propuesta (C3).....	80
Figura 22 Boceto del concepto final mejorado	83
Figura 23 Tipos de estructuras para NFT; a) Estructura piramidal, b) Estructura en diseño de cama, c) Estructura en zigzag y d) Estructura en espiral.....	84
Figura 24 Estructura de soporte	86
Figura 25 Estructura para canales de almacenamiento de lechugas y circulación de solución nutritiva.....	86
Figura 26 Carga aproximada a sostener.	88
Figura 27 Diagrama precio-densidad	89

Figura 28 Perfil Tubo de PVC 3"	91
Figura 29 Pano frontal de cargas presentes en el tubo de PVC de 3" de 95 cm... 93	93
Figura 30 Análisis de tensiones de Von Mises del tubo de PVC de 3 in	94
Figura 31 Análisis de desplazamiento del tubo de PVC de 3 in	94
Figura 32 Análisis de deformaciones del tubo de PVC de 3 in.....	95
Figura 33 Fuerzas presentes en los soportes de los canales	96
Figura 34 Plano frontal de cargas presentes en el tubo de PVC de 3" de 26 cm.. 97	97
Figura 35 a) Reacciones presentes en el conector 'T' del soporte, b) Reacciones presentes en el tubo de PVC de 3/4" vertical.	98
Figura 36 Plano frontal de cargas presentes en el tubo de PVC de 3/4" del soporte	99
Figura 37 Análisis de tensiones de Von Mises del conector 'T'	100
Figura 38 Análisis de desplazamiento del conector 'T'	100
Figura 39 Análisis de deformaciones del conector 'T'	101
Figura 40 Gráfica precio-densidad para la selección de materiales	102
Figura 41 Sistema de alimentación principal	111
Figura 42 Sistema de canales de cultivo	114
Figura 43 Diagrama del ciclo de operación del sistema	119
Figura 44 Árbol de decisión para determinar el módulo para la comunicación con el usuario	129
Figura 45 Funciones membresía del sensor de pH.....	135
Figura 46 Funciones membresía del sensor de conductividad.....	137
Figura 47 Funciones membresía de la bomba de agua	137
Figura 48 Funciones membresía de la bomba de nutrientes	138
Figura 49 Reglas difusas utilizadas.....	139
Figura 50 Superficie de control de la salida: bomba de agua.....	140
Figura 51 Superficie de control de la salida: bomba de nutrientes	140
Figura 52 Representación del control difuso cuando la solución es ácida, valor pH de casi 0	141
Figura 53 Representación del control difuso cuando la solución es básica (valor pH de casi 14).....	142

Figura 54 Diagrama de bloques de la prueba del sistema	142
Figura 55 Diagrama de un circuito de salida del ULN2003	143
Figura 56 Acondicionamiento típico mediante un resistor de “pull down”	144
Figura 57 Circuito de respaldo de energía cuando la alimentación principal no está en funcionamiento	148
Figura 58 Circuito de respaldo de energía cuando la fuente de alimentación funciona correctamente	148
Figura 59 Etapas del diseño de una interfaz gráfica [57]	150
Figura 60 Mapa de empatía	151
Figura 61 Ángulo de visión requerido para aplicaciones	156
Figura 62 Propuesta de diseño de la Interfaz de usuario.	160
Figura 63 Integración del módulo 1	161
Figura 64 Integración del módulo 2	162
Figura 65 Integración del sistema 1	162
Figura 66 Integración del sistema 2	163
Figura 67 Integración del sistema 3	164
Figura 68 Diagrama de integración de todo el sistema	164
Figura 69 Soporte para las sondas de pH y CE, a) vista superior, b) vista isométrica	165
Figura 70 Vista isométrica del sistema	167
Figura 71 Acercamiento al sensor de humedad y temperatura dentro de una carcasa	167
Figura 72 Acercamiento de la Figura 70 hacia la tapa del contenedor de la solución nutritiva.....	167
Figura 73 Soporte para las sondas de pH y CE con dichas sondas.....	168
Figura 74 Vista lateral del sistema	168
Figura 75 Distribución de los componentes dentro de los contenedores	169
Figura 76 Carcasa para los componentes electrónicos.....	169
Figura 77 Distribución de los componentes electrónicos en la carcasa	170
Figura 78 Sensor DHT22 con carcasa	170
Figura 79 Diagrama de bloques para la obtención de los arreglos de los valores de salida del control difuso	174

Figura 80 Diagrama de bloques de la simulación de control por medio de arreglos	175
Figura 81 Representación de la simulación con valores en los sensores de una sustancia muy ácida y conductiva, junto con el diagrama de bloques utilizado ..	176
Figura 82 Representación de la simulación con valores en los sensores de una sustancia muy básica y poco conductiva, junto con el diagrama de bloques utilizado	176
Figura 83 Estructura del sistema hidropónico	177
Figura 84 Vista de la estructura de soporte con todos los elementos del sistema.	178
Figura 85 Carcasa de componentes electrónicos	179
Figura 86 Prueba de compatibilidad del módulo 1 con el resto del sistema	181
Figura 87 Contenedores de sustancias	182
Figura 88 Mediciones de tensión en la bomba peristáltica 1	183
Figura 89 Mediciones de la corriente en la bomba peristáltica 1	183
Figura 90 Mediciones de tensión en la bomba peristáltica 2	184
Figura 91 Mediciones de la corriente en la bomba peristáltica 2	184
Figura 92 Mediciones de la bomba de agua	185
Figura 93 Elementos del módulo de medición	186
Figura 94 Calibración del sensor de pH	187
Figura 95 Calibración de los sensores de pH y CE	188
Figura 96 Salida del sensor de nivel con un led indicador	189
Figura 97 Datos obtenidos del inicio de un ciclo de cultivo.	190
Figura 98 Gráfica de la respuesta de las dos salidas del control en la tarjeta de desarrollo y en simulación	192
Figura 99 Indicadores de comunicación (M1)	192
Figura 100 Indicadores de comunicación del sensor de conductividad	193
Figura 101 Montaje ethernet shield sobre Arduino Mega	193
Figura 102 Monitor Serie Arduino prueba de conexión ethernet.	194
Figura 103 Registro de valores en base de datos.	195
Figura 104 Implementación del sistema energético	196
Figura 105 Prueba 1 del circuito de energía de respaldo	197

Figura 106 Circuito de respaldo	197
Figura 107 Prueba del circuito de acondicionamiento (M2).....	198
Figura 108 Datos necesarios para el usuario	200
Figura 109 Pruebas URL página web	201
Figura 110 Prueba botón de mediciones.....	202
Figura 111 Prueba botón de exportar datos	203
Figura 112 Gráfica del comportamiento de las mediciones de pH	205
Figura 113 Gráfica del comportamiento de las mediciones de conductividad	205
Figura 114 Gráfica del comportamiento de las mediciones de temperatura ambiental	206
Figura 115 Gráfica del comportamiento de las mediciones de humedad ambiental	206
Figura 116 Análisis de tensiones de Von Mises del soporte de sondas pH y CE	240
Figura 117 Análisis de desplazamiento del soporte de sondas pH y CE	241
Figura 118 Análisis de deformaciones del soporte de sondas pH y CE	241
Figura 119 Diagrama de flujo principal.....	242
Figura 120 Diagrama de flujo de la subrutina de control difuso.....	243
Figura 121 Diagrama de flujo de la subrutina para realizar la comunicación entre el microcontrolador y el servidor web (interfaz).....	244
Figura 122 Diagrama electrónico	251
Figura 123 Capa inferior del PCB del circuito de respaldo.	251
Figura 124 Capa superior en espejo del PCB del circuito de respaldo.	252
Figura 125 Capa inferior del PCB para sensores de nivel.....	252
Figura 126 Capa inferior del PCB para bombas peristálticas	252
Figura 127 Capa inferior del PCB para botones de reinicio.	253
Figura 128 Capa inferior del PCB para Led indicador de error de conexión ethernet.	253

IV. Índice de tablas

Tabla 1 Características de trabajos recientes relacionados al control y/o monitoreo de pH y/o CE	34
Tabla 2 Necesidades del sistema.....	52
Tabla 3 Requerimientos del sistema	54
Tabla 4 Matriz de trazabilidad de funciones-requerimientos	62
Tabla 5 Matriz de trazabilidad	70
Tabla 6 Características asociadas al sistema	72
Tabla 7 Criterios asociados a características	73
Tabla 8 Primer propuesta	75
Tabla 9 Segunda propuesta de concepto solución.....	76
Tabla 10 Tercer propuesta de concepto solución.....	78
Tabla 11 Desempeño general de los conceptos	81
Tabla 12 Componentes de la estructura hidropónica.....	86
Tabla 13 Atributos de la estructura hidropónica	88
Tabla 14 Vector de prioridad	90
Tabla 15 AHP del material.....	90
Tabla 16 Consideraciones para la selección de procesos	90
Tabla 17 Análisis y resultados del tubo de 3"	93
Tabla 18 Análisis y resultados del conector 'T'	99
Tabla 19 Atributos de la carcasa para los componentes electrónicos.....	101
Tabla 20 Vector de prioridad	102
Tabla 21 AHP del material.....	103
Tabla 22 Consideraciones para la selección de procesos	103
Tabla 23 Cantidad de Litros mínimos de solución nutritiva para el contenedor principal.....	104
Tabla 24 Atributos del contenedor principal del sistema para la solución nutritiva de riego.	105
Tabla 25 Propuestas para determinar el contenedor principal	105
Tabla 26 Atributos de los contenedores secundarios (agua y solución nutritiva concentrada)	106

Tabla 27 Propuestas para seleccionar el contenedor de agua	106
Tabla 28 Propuestas para seleccionar el contenedor de concentrado de nutrientes	107
Tabla 29 Proporciones de macronutrientes en 40 L de agua para la elaboración de concentrado de solución nutritiva.....	108
Tabla 30 Proporciones para la elaboración de la solución madre de micronutrientes concentrada para 1000 litros de agua.....	108
Tabla 31 Atributos de la bomba principal de alimentación al sistema hidropónico.....	115
Tabla 32 Propuestas para la bomba principal	116
Tabla 33 Atributos de la bomba de oxigenación.....	117
Tabla 34 Vector de prioridad	117
Tabla 35 Resultado AHP	118
Tabla 36 Atributos de las bombas secundarias.....	119
Tabla 37 Vector de prioridad	120
Tabla 38 Resultado AHP para las bombas secundarias	120
Tabla 39 CE ideal para el desarrollo de la Lechuga por semanas.....	121
Tabla 40 Constante de celda óptima para soluciones comunes [19]	122
Tabla 41 Atributos del sensor de conductividad	122
<i>Tabla 42 Vector de prioridad</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 43 Resultado AHP sensor de CE</i>	<i>123</i>
Tabla 44 Atributos del sensor de pH	124
Tabla 45 Vector de prioridad	124
Tabla 46 Resultado AHP sensor de pH.....	125
Tabla 47 Atributos de los sensores de temperatura y humedad	125
Tabla 48 Vector de prioridad	126
Tabla 49 Resultado AHP sensor de temperatura y humedad	126
Tabla 50 Atributos de los sensores de nivel.....	126
Tabla 51 Vector de prioridad	127
Tabla 52 Resultado AHP sensor de temperatura y humedad	127
Tabla 53 Atributos de componente de tiempo real	127

Tabla 54 Vector de prioridad	128
Tabla 55 Resultado AHP	128
Tabla 56 Módulo de comunicación	130
Tabla 57 Atributos del dispositivo de procesamiento	131
Tabla 58 Vector de prioridad	132
Tabla 59 Resultado AHP dispositivo de procesamiento	132
Tabla 60 Especificaciones técnicas Wemos D1 R32 ESP32	133
Tabla 61 Tabla de valores para convertir la señal analógica en pH [53]	135
Tabla 62 Consumo energético esperado de los componentes de CD del sistema	145
Tabla 63 Atributos de la fuente de alimentación.....	146
Tabla 64 Vector de prioridad	147
Tabla 65 Resultado AHP de la fuente de alimentación	147
Tabla 66 Tareas del usuario.....	152
Tabla 67 Verificación de dimensiones de la estructura	178
Tabla 68 Validación de requerimientos de la cubierta.....	180
Tabla 69 Validación de requerimientos del actuador de flujo de solución	180
Tabla 70 Flujo por minuto de las bombas peristálticas.....	185
Tabla 71 Características principales de los sensores de temperatura y humedad	189
Tabla 72 Consumo energético medido de los componentes de CD del sistema.	198
Tabla 73 Valores de pH y conductividad registrados después de agregar agua de forma manual a la solución nutritiva	207
Tabla 74 Valores de pH y conductividad registrados después de ejecutar el control difuso en los contenedores	207
Tabla 75 Valores de pH y conductividad registrados después de agregar concentrado de nutrientes de forma manual a la solución nutritiva.....	208
Tabla 76 Valores de pH y conductividad registrados después de ejecutar el control difuso en los contenedores	208
Tabla 77 Costo compras en línea.....	212
Tabla 78 Costo compras presencial	213
Tabla 79 Costo corte a láser e impresión 3D	215

Tabla 80 Costo por traslados	216
Tabla 81 Costos por servicios	216
Tabla 82 Costos totales.....	216
Tabla 83 Matriz binaria	221
Tabla 84 Matriz de criterios sin normalizar	222
Tabla 85 Matriz de criterios normalizada.....	222
Tabla 86 AHP Criterio 1	223
Tabla 87 AHP Criterio 2	223
Tabla 88 AHP Criterio 3	223
Tabla 89 AHP Criterio 4	223
Tabla 90 AHP Criterio 5	223
Tabla 91 AHP Criterio 6	223
Tabla 92 AHP Criterio 7	223
Tabla 93 AHP Criterio 8	223
Tabla 94 AHP Criterio 9	223
Tabla 95 AHP Criterio 10.....	223
Tabla 96 Matriz de criterios sin normalizar	224
Tabla 97 Matriz de criterios normalizada.....	224
Tabla 98 AHP Criterio 1	225
Tabla 99 AHP Criterio 2	225
Tabla 100 AHP Criterio 3	225
Tabla 101 AHP Criterio 4	225
Tabla 102 AHP Criterio 5	225
Tabla 103 AHP Criterio 6	225
Tabla 104 AHP Criterio 7	226
Tabla 105 AHP Criterio 8	226
Tabla 106 AHP Criterio 9	226
Tabla 107 AHP Criterio 10	226
Tabla 108 AHP Criterio 11	226
Tabla 109 Matriz de criterios sin normalizar	227

Tabla 110 Matriz de criterios normalizada.....	227
Tabla 111 AHP Criterio 1	227
Tabla 112 AHP Criterio 2	227
Tabla 113 AHP Criterio 3	228
Tabla 114 Matriz de criterios sin normalizar.....	228
Tabla 115 Matriz de criterios normalizada.....	228
Tabla 116 AHP Criterio 1	228
Tabla 117 AHP Criterio 2	228
Tabla 118 AHP Criterio 3	229
Tabla 119 Matriz de criterios sin normalizar.....	229
Tabla 120 Matriz de criterios normalizada.....	229
Tabla 121 AHP Criterio 1	230
Tabla 122 AHP Criterio 2	230
Tabla 123 AHP Criterio 3	230
Tabla 124 Matriz de criterios sin normalizar.....	230
Tabla 125 Matriz de criterios normalizada.....	230
Tabla 126 AHP Criterio 1	231
Tabla 127 AHP Criterio 2	231
Tabla 128 AHP Criterio 3	231
Tabla 129 AHP Criterio 4	231
Tabla 130 Matriz de criterios sin normalizar.....	233
Tabla 131 Matriz de criterios normalizada.....	233
Tabla 132 AHP criterio 1	233
Tabla 133 AHP criterio 2	233
Tabla 134 Matriz de criterios sin normalizar.....	233
Tabla 135 Matriz de criterios normalizada.....	234
Tabla 136 AHP criterio 1	234
Tabla 137 AHP criterio 2	234
Tabla 138 AHP criterio 3	234
Tabla 139 Matriz de criterios sin normalizar.....	235

Tabla 140 Matriz de criterios normalizada.....	235
Tabla 141 AHP Criterio 2	236
Tabla 142 AHP Criterio 4	236
Tabla 143 AHP Criterio 1	236
Tabla 144 AHP Criterio 3	236
Tabla 145 Matriz de criterios sin normalizar	236
Tabla 146 Matriz de criterios normalizada.....	237
Tabla 147 AHP Criterio 2	237
Tabla 148 AHP Criterio 3	237
Tabla 149 AHP Criterio 1	237
Tabla 150 Matriz de criterios sin normalizar	238
Tabla 151 Características de las bombas de aire consideradas	239
Tabla 152 Análisis y resultados del soporte de sondas pH y CE	240
Tabla 153 Características de las bombas peristálticas consideradas	245
Tabla 154 Características de los sensores de conductividad eléctrica considerados	245
Tabla 155 Características de los sensores de potencial de hidrógeno considerados	246
Tabla 156 Características de los sensores de humedad y temperatura considerados	246
Tabla 157 Características de los sensores de nivel considerados.....	247
Tabla 158 Características de los relojes externos considerados.....	248
Tabla 159 Características de las tarjetas de desarrollo consideradas	249
Tabla 160 Características de las fuentes de alimentación consideradas	250

Lista de abreviaturas

- AC** Alternating Current (Corriente alterna)
- AHP** Analytical **H**ierarchy **P**rocess. (Proceso analítico de jerarquía)
- CD** Corriente **d**irecta
- CE** Conductividad **E**léctrica
- FBS** Functional **B**reakdown **S**tructure (Estructura de descomposición funcional)
- FMA** Finite **E**lement **A**nalysis (Análisis de Elemento Finito)
- FIS** Fuzzy Inference System (Sistema de Inferencia Difuso)
- IDEF** Integration **D**Efinition for Function Modeling (Definición de integración para modelado de funciones)
- LED** Light-emitting diode (Diodo emisor de luz)
- NFT** Nutrient **F**ilm **T**echnique (Técnica por película nutritiva)
- pH** Potencial de **H**idrógeno
- PWM** Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulsos)
- PVC** Polyvinyl Chloride (Cloruro de polivinilo)
- QFD** Quality **F**unction **D**evelopment (Despliegue de la función de calidad)
- RTC** Real-Time Clock (Reloj de tiempo real)
- rpm** Revoluciones por minuto
- VDI** Verein **D**eutscher Ingenieure (Asociación de Ingenieros Alemanes)
- IDE** Entorno de **D**esarrollo Integrado

Simbología

A	Área de la sección transversal
D	Diámetro de la tubería
ε	Coefficiente de rugosidad
f	Factor de fricción del flujo
h_A	Energía añadida al fluido por la bomba
h_L	Perdidas debido a la fricción
H	Tamaño de la letra
K	Coefficiente de resistencia
k	Constante de celda
L	Longitud de la tubería
N_R	Número de Reynolds
P_A	Potencia de la bomba
P	Presión
Q	Caudal del fluido
R	Radio hidráulico
v	Velocidad promedio del fluido
ν	Viscosidad del fluido
z	Altura de los puntos de referencia
σ_{vm}	Esfuerzo de Von Mises
γ	Peso específico
ρ	Densidad específica
θ	Ángulo

Introducción

El siglo XXI se caracteriza por un crecimiento mundial de la población y su concentración principalmente en las ciudades, así como por la expansión territorial de estas. Uno de los principales desafíos a enfrentar es la seguridad alimentaria ya que podría resultar difícil asegurar la disponibilidad y el acceso a suficientes alimentos para los habitantes de las grandes ciudades y metrópolis en algún momento [1]. El crecimiento de la producción alimentaria e incluso el económico de los países se ha conseguido en muchas ocasiones con la transformación de zonas forestales o de otro tipo de ecosistemas naturales a campos de cultivo, provocando la disminución de la capacidad del suelo para producir bienes económicos, la disminución en productividad agrícola y el mantenimiento de la calidad del agua y aire [2].

Lo anteriormente planteado dio origen a la producción urbana de alimentos, así como la adopción de prácticas sostenibles. Una tecnología agrícola sostenible incorporada a la producción de alimentos adoptada por varios países es la hidroponía principalmente porque se pueden cultivar algunas frutas y hortalizas en disoluciones minerales y no en el suelo lo que ayuda a la conservación de estos. Al mismo tiempo permite la disminución en el consumo de agua y el aprovechamiento de cualquier espacio disponible como azoteas, jardines, paredes, etc. [3] Otras ventajas que ofrece es la producción de cosechas contra estación, la aceleración del cultivo y la obtención de productos sin fertilizantes e insecticidas [4].

La Ciudad de México extiende su territorio a una tasa anual de 4 % y su población en 3.2 % lo que ha originado su expansión urbana y la pérdida de zonas rurales dentro de la ciudad [5] las cuales se encuentran principalmente en las delegaciones, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco, en donde se producen maíz, frutas y hortalizas para el autoconsumo familiar, venta local y en algunos casos nopal, amaranto, hortalizas, hierbas y plantas ornamentales para los mercados urbanos regionales [6]. A consecuencia de ello, según datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural algunos agricultores dentro de la ciudad de México han optado por la técnica de hidroponía.

La hortaliza con menor producción en el mundo es la lechuga, sin embargo, en México en el año 2018 ocupó el cuarto lugar debido al incremento generado por los

diferentes sistemas agrícolas aplicados para obtención de este producto entre ellos, la hidroponía [7]. Por otro lado, también ha sido gracias a la implementación de tecnologías lo que ha ayudado al incremento de la producción de hortalizas en general, posteriormente se abordarán algunas problemáticas que enfrentan los productores medianos y pequeños en este aspecto.

En el presente trabajo se consulta a un productor local de lechugas hidropónicas en la delegación Tláhuac acerca de sus dificultades a fin de reducir su intervención en el proceso de producción a través del desarrollo de un sistema de control de PH y conductividad en el depósito de agua de riego para un sistema de cultivo hidropónico de lechuga por la técnica de película nutritiva proporcional al del productor local de lechugas; debido a que no es posible trabajar con la plantación real al mismo tiempo que en una plantación menor es posible implementar el sistema automático de nivel de pH y conductividad en la mezcla de nutrientes para el riego de estas lechugas que se pretende desarrollar.

Con la posibilidad a futuro de su implementación en un sistema de mayor producción para la venta local a restaurantes y personas. A sí mismo se pretende que el proyecto favorezca a los agricultores urbanos para que sigan beneficiando con sus productos a la comunidad mexicana y contribuyendo a la economía local.

Enfoque Mecatrónico

El objetivo de automatizar la regularización de pH y CE en la mezcla de nutrientes para riego de la lechuga hidropónica es proporcionar, mediante distintas disciplinas de la mecatrónica como control, electrónica, informática y su interacción sinérgica, un sistema que puedan mantener la mayor cantidad de lechugas con los parámetros recomendados para tener un crecimiento uniforme entre ellas manteniendo los nutrientes y agua necesarios.

En el proyecto se involucra el control y la electrónica para mantener la mezcla de nutrientes o solución nutritiva dentro de los valores de pH y CE deseados para el crecimiento de la lechuga mediante la técnica de NFT. Este control se logra mediante la interacción y en conjunto con la programación y la electrónica. La electrónica realiza la lectura de las mediciones necesarias del pH, CE, temperatura y humedad ambiental, así como el nivel de las diversas sustancias en los contenedores; también se realiza el acondicionamiento y envío de señales de control para posteriormente se realice la procesamiento e interpretación de dichas mediciones. Mediante la programación es posible desarrollar software para procesar, almacenar e interpretar la información con la que se puede desarrollar una interfaz. Esto para que el control pueda monitorear y manipular las variables pH y CE. En conjunto, el sistema es capaz de mantener la solución nutritiva en los valores de pH y CE deseados sin que el usuario intervenga de manera recurrente.

Con los valores de pH y CE requeridos las lechugas tendrán un crecimiento más uniforme esperando que el usuario mantenga los contenedores a una temperatura menor de 25°C y mayor a los 18°C ya que es importante para que las lechugas absorban mejor los nutrientes y que el agua de riego tenga una conductividad menor a 800 mili siemens y un pH de aproximadamente 7 para el correcto funcionamiento del sistema.

Definición del problema

El productor local actualmente cuenta con tres áreas dentro de su vivienda adaptadas para el cultivo hidropónico de lechuga. Dichas áreas están localizadas a diferente nivel sobre el piso. Así mismo las instalaciones de los sistemas hidropónicos de cada una de las áreas corresponden a diferentes capacidades de producción. En la Figura 1 se puede observar dicha distribución.



Figura 1 Distribución actual de los cultivos hidropónicos NFT del productor local

Medición de pH y conductividad

Para la regulación de pH y conductividad el productor hace uso de dos contenedores uno con solución nutritiva y otro con agua (Figura 2).

Se toma una muestra de solución nutritiva para riego (mezcla de solución nutritiva con agua) como se muestra en la Figura 3 y se verifica su pH agregándole una gota de líquido indicador de pH a la muestra (Figura 4). El color de la muestra debe tornarse entre un color naranja claro o amarillento, esto indicará que se encuentra entre 6 y 6.5 el valor del pH. En caso de tener un color cercano a un naranja fuerte o rojo indica que la solución está ácida por lo que se debe agregar agua a la solución nutritiva de riego. Si el color es más cercano a un verde o ligeramente azul indica que la solución es alcalina y se le necesita agregar solución nutritiva. El productor lleva laborando en este campo desde hace 3 años por lo que empíricamente identifica el color de la muestra que debe tener.



Figura 2 Contenedores de solución nutritiva y agua.



Figura 3 Obtención de muestra de la solución nutritiva para riego.



Figura 4 Medición de pH de la solución nutritiva para riego.

En la medición de conductividad eléctrica el productor se auxilia de un medidor de conductividad digital (Figura 5). Si el valor de la conductividad eléctrica medido es menor al valor ideal se le agrega mayor cantidad de solución nutritiva para que su valor se eleve. Si el valor medido es mayor se le agrega agua para que su valor disminuya.



Figura 5 Medición de la CE de la solución nutritiva para riego.

Dificultades

El productor es el principal encargado de realizar las mediciones de pH y conductividad, así como de supervisar y realizar todas las actividades que las etapas de un cultivo hidropónico conllevan, por ello encuentra complicado el seguimiento de dichas labores en los días que realiza la entrega de lechugas a los restaurantes locales y cafeterías en la delegación Tláhuac a los que principalmente surte. Por otro lado, pese a recibir ayuda por parte de sus hijos en los días donde él debe realizar otras actividades, el control y monitoreo del pH y conductividad eléctrica no se realiza en el tiempo sugerido ni de la manera adecuada debido a la falta de experiencia y conocimiento. Estas malas prácticas afectan directamente a los cultivos provocando el mal desarrollo de las lechugas y en el peor de los casos en la pérdida de estas mismas. Lo que directamente se refleja en una menor producción y menores ganancias económicas. En la Figura 6 se puede observar que el tamaño de las lechugas en el cultivo varía bastante a comparación del cultivo de la Figura 7, donde se pueden apreciar las lechugas en su última semana de crecimiento, sin embargo, con un tamaño más uniforme resultado de un mejor control de pH y CE en la solución nutritiva de riego.

El monitoreo del pH y conductividad eléctrica de la solución nutritiva de riego debe realizarse constantemente, actualmente lo realiza cada dos horas durante todo el día, lo que implica tener que checar cada uno de los cultivos hidropónicos de las diferentes áreas con esa misma frecuencia. De acuerdo con el productor hay ocasiones en las que el monitoreo no es necesario puesto que los valores de pH y conductividad eléctrica del sistema se mantiene dentro de los rangos ideales, sin embargo, no cuenta con otra forma de verificarlo más que hacerlo él mismo de manera manual.



Figura 6 Problemas de desarrollo en las lechugas



Figura 7 Buen desarrollo de las lechugas

Los retos identificados para la implementación de un regulador automático de pH y conductividad en un sistema hidropónico son los siguientes:

- Medición de parámetros en la solución que circula por el sistema.
- Distribución de la cantidad adecuada de la sustancia correspondiente para mantener en rango el nivel de pH y de conductividad.
- Diseño del sistema de control para mantener la solución nutritiva en los parámetros adecuados.
- Selección de un modelo y/o construcción de la estructura de un sistema hidropónico para las pruebas de funcionamiento.
- Diseño e implementación de una interfaz gráfica en donde se puedan monitorear los valores acordes a la frecuencia de muestreo y valores anteriores.

Justificación

La mayoría de las técnicas de producción en hidroponía son de sistema cerrado, es decir que la solución nutritiva que no fue absorbida por la planta se recupera y es reutilizada. Tal es el caso de la técnica de cultivo hidropónico por película nutritiva (NFT) que consiste en mantener en circulación una fina capa de solución nutritiva en las raíces de las plantas para proveerlas de agua, nutrientes y oxígeno. La parte de este proceso que requiere atención constante es la aplicación balanceada y oportuna de solución nutritiva, seguido por la conservación de un pH y temperatura óptima que favorezcan una concentración adecuada de iones y una correcta absorción de agua y nutrientes respectivamente, aspectos que influyen en la composición química de las plantas y se reflejan en su desarrollo [8].

La dificultad de esta técnica de cultivo radica en que la concentración de nutrientes en la solución nutritiva tiende a variar dentro del sistema cerrado debido a la absorción de nutrientes o de agua que realizan los cultivos [9]. Existe una relación directa entre la concentración de nutrientes, la conductividad eléctrica (CE) y el potencial de hidrógeno (pH) de la solución [8] razón por la cual los productores locales y en particular un pequeño productor de lechuga hidropónica de la delegación Tláhuac, frecuentemente realizan el ajuste de concentración, de nivel de pH y CE de manera manual con la ayuda de un medidor portátil para la conductividad eléctrica y un líquido indicador para el pH, sin embargo, esta corrección manual de los parámetros en la solución generalmente causa estrés a las plantas debido a la imprecisión y retraso en el mismo [9].

En vista de esta situación, el objetivo de este trabajo es ofrecer un sistema mecatrónico capaz de monitorear y corregir la concentración de nutrientes y nivel de pH en la solución cuyos parámetros y datos puedan ser visualizados en una interfaz gráfica, que sirva de apoyo al productor local en el cuidado y la toma de decisiones respecto a sus cultivos.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un sistema capaz de monitorear y regular el nivel de pH y conductividad en el depósito de agua de riego de un sistema de cultivo hidropónico de lechuga construido a escala.

Objetivos específicos

1. Trabajo Terminal 1

- 1.1 Especificar las dimensiones y forma del sistema hidropónico a escala que se va a construir.
- 1.2 Diseñar el módulo de control del sistema.
- 1.3 Determinar los actuadores a utilizar para el flujo de soluciones a manipular.
- 1.4 Diseñar y simular el circuito electrónico del sistema de control y monitoreo, empleando sensores de pH y de conductividad, humedad y temperatura ambiental.
- 1.5 Diseñar una interfaz gráfica de usuario.
- 1.6 Realizar una validación modular del funcionamiento del sistema.

2. Trabajo Terminal 2

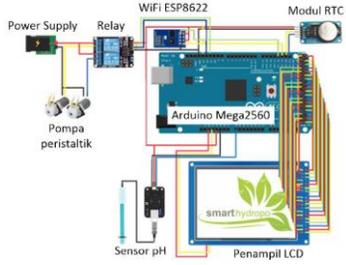
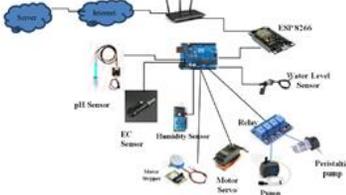
- 2.1 Construir a escala la estructura del sistema hidropónico para el cultivo de lechugas.
- 2.2 Implementar los circuitos electrónicos necesarios en conjunto con el sistema de control.
- 2.3 Integrar los módulos electrónicos y de comunicación del sistema.
- 2.4 Integrar los actuadores a utilizar para el flujo de soluciones a manipular con la estructura mecánica correspondiente y el sistema electrónico a implementarse en el prototipo a escala del sistema hidropónico.
- 2.5 Programar la interfaz gráfica de usuario.
- 2.6 Verificar el funcionamiento del sistema por módulos.
- 2.7 Integrar físicamente el sistema completo y verificar su funcionamiento.

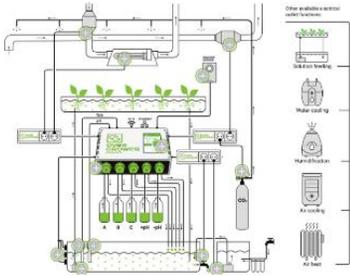
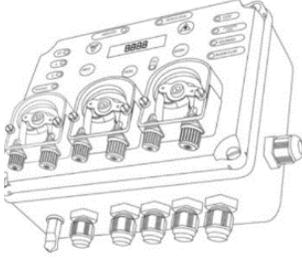
Antecedentes

Los proyectos en la Tabla 1 tienen como objetivo cumplir con una función similar a la que se busca el presente trabajo.

Tabla 1 Características de trabajos recientes relacionados al control y/o monitoreo de pH y/o CE

#	Nombre	Descripción	Características	País	Año	Organización	Tipo	Imagen	Ref.
1	Automatización de la irrigación de un sistema hidropónico NFT.	Sistema hidropónico de uso doméstico con monitoreo y control del pH y CE en la solución nutritiva.	<p>Planta: Lechuga.</p> <p>Estructura: Vertical.</p> <p>Cantidad de producción: 56 lechugas.</p> <p>Materiales para la estructura: PVC, plástico, PTR cuadrado.</p> <p>Procesamiento y Adquisición de datos: Arduino MEGA.</p> <p>HMI: Computadora-LabVIEW.</p> <p>Comunicación: Protocolo USB.</p> <p>Tipo de control: Control difuso</p>	México	2018	UPIIZ	Trabajo Terminal		[10]
2	Prototipo para el cultivo hidropónico de jitomate Cherry utilizando la técnica de película nutritiva en un invernadero.	Sistema de control y monitoreo de solución nutritiva, temperatura, humedad relativa y radiación solar de un cultivo hidropónico de jitomate Cherry utilizando la técnica de película nutritiva.	<p>Planta: Jitomate Cherry.</p> <p>Estructura: Horizontal.</p> <p>Cantidad de producción: 18 plantas de jitomate Cherry.</p> <p>Materiales para la estructura: PVC, madera, plástico, PTR cuadrado.</p> <p>Procesamiento y Adquisición de datos: PIC16F887</p> <p>HMI: Pantalla LCD</p>	México	2016	UPIITA	Trabajo Terminal		[11]

3	PH control for deep flow technique hydroponic IoT systems based on fuzzy logic controller	Sistema de control que mide y ajusta el valor de pH en la solución nutritiva de cultivos hidropónicos	<p>Planta: Lechuga.</p> <p>Estructura: Diseño de cama para un sistema DFT</p> <p>Procesamiento y adquisición de datos: ATmega2560, módulo ESP82622 Wifi</p> <p>Comunicación: Inalámbrica</p> <p>Interfaz: Pantalla LCD y sitio web</p> <p>Otras características:</p> <p>Estabilidad del pH en el rango de 6,5 a 7,5 con tiempo de estabilización de menos de 40 segundos sin interrupción</p>	Indonesia	2020	Politeknik Negeri Bandung	Artículo de Investigación		[12]
4	Smart hydroculture control system based on IoT and fuzzy logic	Sistema de control que mide y ajusta el valor de pH y concentración de nutrientes dentro de un rango especificado en una plantación hidropónica por la técnica (NFT)	<p>Plantas: Lechuga</p> <p>Estructura: Diseño de cama.</p> <p>Procesamiento y Adquisición de datos: ATmega328, módulo ESP8266 Wifi</p> <p>Comunicación: Inalámbrica</p> <p>Tipo de control: Control difuso</p>	Indonesia	2020	Binus University	Artículo de Investigación		[13]
5	Huertomato	Código que monitorea la temperatura, humedad, luz, pH, CE y el nivel del tanque de agua	<p>Aplicación: Manejo de sistemas hidropónicos</p> <p>Procesamiento y Adquisición de datos: Arduino MEGA 2560</p> <p>Almacenamiento de los datos de los sensores: Memoria SD</p> <p>Comunicación: Ethernet</p> <p>HMI: pantalla LCD</p> <p>Funciones: Monitorear temperatura, humedad, luz, pH, CE y el nivel del tanque de agua y cuando uno de estos valores no está dentro de los rangos se activa una alarma. Además de programar la activación de la bomba de agua cuando se requiera.</p>	EE.UU.	-	Arduino	Código libre		[14]

6	Over grower	Dispositivo que corrige los elementos y el pH de la solución nutritiva, además de crear condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de la planta.	<p>Uso: doméstico hasta en sistemas con tamaño de 10000m².</p> <p>Regulación: pH y de solución nutritiva.</p> <p>Sensores: temperatura, nivel del tanque de suministro, concentración de CO2, pH, TDS</p> <p>Otras funciones posibles para activar: Suministrar solución nutritiva, activar aire acondicionado, refrigeración.</p> <p>Conexión: wifi y ethernet</p> <p>HMI: pantalla-aplicación over grower</p>	Rusia	2019	Over grower	Producto		[15]
7	pH&Ec Controller, dosificador automático de medición continua.	Dispositivo controlador de medición continua y dosificación automática de abonos líquidos para la conductividad eléctrica y pH para depósitos en cualquier sistema de riego.	<p>Aplicación: Cualquier sistema de riego o aplicación que involucre la medición de pH y EC.</p> <p>Modos de operación: modo continuo (riego por 24 hrs) modo horario (riego configurado por tiempos, días y ciclos de riego).</p> <p>HMI: pantalla.</p> <p>Otras funciones posibles para activar: Sondas de nivel de los depósitos, electroválvula de llenado, sensor de flujo.</p>	España	-	Prosystem Aqua	Producto		[16]

En el repositorio digital de tesis del Instituto Politécnico Nacional se encontraron dos trabajos relacionados a los cultivos hidropónicos con técnica de película nutritiva. El proyecto que más se asemeja en funcionalidad respecto a los objetivos planteados en este proyecto es [10], en el cual se monitorea y controla el pH y la conductividad eléctrica en la solución nutritiva de un sistema hidropónico de lechuga de uso doméstico a través de un control difuso, también implementa una interfaz humano-máquina utilizando el software LabVIEW instalado en una computadora personal que se conecta de manera alámbrica al sistema de control. A diferencia de ese proyecto, el presente trabajo busca tener una interfaz gráfica que no requiera instalación de software especializado ni el uso de un equipo de cómputo exclusivamente para este fin, pues, el cultivo urbano con frecuencia se lleva a cabo en espacios al aire libre y de difícil acceso como son azoteas, balcones o terrazas [17], donde la instalación de un equipo de cómputo no sería recomendable dadas las condiciones ambientales y de espacio. Por otra parte, en [11], el cultivo utilizado es un cultivo hidropónico de jitomate Cherry y principalmente controlan las condiciones ambientales del todo el sistema dentro de un invernadero, limitándose a solo monitorear el pH y la conductividad eléctrica a fin de que la corrección se realice manualmente.

Existen proyectos académicos realizados por universidades extranjeras con relación al monitoreo y control de variables en cultivos hidropónicos. En [12] se propone únicamente un sistema de monitoreo y control para el pH utilizando lógica difusa e implementando el método de inferencia tipo Mamdani y haciendo un control de lazo cerrado tomando en cuenta el error del valor de pH. Este proyecto hace la visualización de las lecturas del pH en un sitio web, en el cual muestran el valor del pH, el valor del “set point”, el valor del error, y el valor de la desdifusificación para perteneciente a las bombas peristálticas que aumentan o disminuyen el valor del pH, así como la opción de ver de manera gráfica las mediciones y la hora a las que fueron capturadas. La activación de las bombas se realiza por un módulo de relevadores el cual se activa y se apaga a través de un módulo de tiempo real. Por otro lado, en [13] se realiza un sistema capaz de ajustar y almacenar las mediciones del pH, CE y humedad implementando un control difuso y haciendo uso de un servidor web. El control difuso de dicho trabajo tiene por entradas a cuatro variables siendo estas el valor de pH, el valor de la CE, el nivel del agua y la temperatura ambiente y como parámetros de salida la duración del tiempo de activación (segundos) de los respectivos actuadores para las correcciones del nivel del agua del tanque principal, los valores de pH y CE, así como la activación de un motor para abrir o cerrar una cortina. Por último, en [14] se realiza el monitoreo y el control de la temperatura, humedad, luminosidad, CE, pH y nivel de sustancia de riego. La información de este sistema es almacenada en una memoria SD para posteriormente realizar una consulta de dichos datos.

Los trabajos previamente mencionados nos brindan un panorama de las herramientas posibles a utilizar como alternativas que dan solución al desarrollo de una interfaz

humano-máquina sin software especializado y al monitoreo en tiempo real de cultivos localizados en distintos lugares. El presente proyecto comparte la característica de tener una interfaz inalámbrica y mostrarle al usuario datos necesarios para él. Se diferenciará por mostrarle datos de lecturas recientes o actuales y brindarle la opción de consultar lecturas anteriores, además de notificarle a que temperatura y humedad se encuentra el área de cultivo y la implementación de algunas notificaciones por falta de energía o sustancia en los respectivos contenedores.

Por último, al final de la Tabla 1 se mencionan dos productos extranjeros comerciales los cuales realizan el control de pH y conductividad eléctrica de una solución. El producto over grower [15] está especializado para su uso en cultivos hidropónicos con técnica de película nutritiva mientras que el producto pH&EC controller [16] es adaptable a cualquier aplicación donde se deban medir y controlar las variables anteriormente mencionadas. El primer producto mencionado ofrece una gran variedad de funciones tales como la regulación de nutrientes, la medición y control del pH y conductividad eléctrica en la solución nutritiva, la posibilidad controlar la temperatura e iluminación dentro del espacio donde se encuentran los cultivos, así como conectar otras variables al dispositivo para su control como es el caso del aire acondicionado, refrigeración, humidificación del aire, entre otras, las cuales mejoran el crecimiento y desarrollo de las plantas en los cultivos hidropónicos. Sin embargo, su adquisición resulta complicada siendo que únicamente el producto se encuentra a la venta en países de Europa, Asia y Norte América y con un costo elevado. El presente trabajo busca al menos satisfacer dos de las actividades esenciales (control de pH y CE en la solución nutritiva de riego) que se llevan a cabo en el proceso del cultivo hidropónico de lechuga con la finalidad de ser útil en cultivos de pequeña escala sin estar sobrado por funcionalidades y tener un menor costo.

Organización del documento

En el Capítulo 1, denominado “Marco referencial” se introducen conceptos, teorías y métodos relevantes para el desarrollo del proyecto por lo que este capítulo incluye, el marco conceptual, marco teórico y marco procedimental.

En el Capítulo 2, “Diseño” se toma encuentran los siguientes apartados:

En la sección 1, “Diseño del sistema”, introduce las necesidades y requerimientos, se plantea la arquitectura funcional y física del sistema para poder plantear diversos conceptos solución y seleccionar el que mejor satisface las necesidades y requerimientos planteados.

En la sección 2, “Diseño de dominio específico” se desarrolla a profundidad los elementos que conforman cada uno de los módulos que se plantearon para el concepto solución elegido al final del capítulo 2.1.

En la sección 3, “Integración del sistema” se plantea la integración de nivel módulo a nivel sistema a través de diagramas y procesos para verificar que cada una de las partes del sistema opera en conjunto con las demás. Se presenta de manera secuencial primero la integración de hardware y después la de software.

En el Capítulo 3, “Implementación” se describe el proceso de ensamble e integración del sistema, realizando pruebas en cada módulo para detectar y solucionar problemas mediante el rediseño de alguno de los mismos a fin de garantizar el funcionamiento del sistema completo.

En el Capítulo 4, “Análisis de resultados” se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, así como una estimación de costos.

Finalmente, se muestran las *Conclusiones* del proyecto, así como las *Recomendaciones y trabajo futuro*.

Capítulo 1. Marco de Referencia

1.1 Marco conceptual

1.1.1 Hidroponía

La hidroponía es el conjunto de técnicas que permiten la producción o cultivo sin el uso de suelo. Estas técnicas (Figura 8) se abastecen de agua y se apoyan en el uso de sustratos o en sistemas con aportes de solución de nutrientes estáticos o circulantes para brindarles a las plantas los elementos nutritivos a través de soluciones líquidas, sin descuidar otros parámetros importantes para su desarrollo como temperatura, humedad y agua.



Figura 8 Conjunto de técnicas hidropónicas

Técnica por película nutritiva (NFT)

El funcionamiento de un sistema NFT (ilustrado en la Figura 9) consiste en recircular continuamente una solución nutritiva por una serie de canales, llamados canales de cultivo. En cada canal hay agujeros donde se colocan las plantas, y estos canales tienen una ligera pendiente o desnivel que facilita la circulación de la solución. Luego la solución es recolectada y almacenada en un tanque. Una bomba funciona continuamente durante el día, permitiendo la circulación, por los canales de cultivo, de una película o lamina de solución nutritiva. Esta recirculación mantiene a las raíces en contacto permanente con

la solución nutritiva, favoreciendo la oxigenación de las raíces y un suministro adecuado de nutrientes minerales para las plantas.



Figura 9 Esquema básico de funcionamiento de la técnica por película nutritiva

1.1.2 Solución Nutritiva

Una solución nutritiva consta de agua con oxígeno y de todos los nutrimentos esenciales en forma iónica y, eventualmente, de algunos compuestos orgánicos tales como los quelatos de hierro y de algún otro micronutriente que puede estar presente.

La pérdida por precipitación de una o varias formas iónicas de los nutrimentos, puede ocasionar su deficiencia en la planta, además de un desbalance en la relación mutua entre los iones.

Es esencial que la solución nutritiva tenga la proporción adecuada, necesaria para que las plantas absorban los nutrimentos; en caso contrario, se puede producir un desequilibrio entre los nutrimentos, lo que da lugar a excesos o déficit en el medio de cultivo y afectar la producción.

1.1.3 Conductividad Eléctrica (CE)

La unidad de la conductividad son siemens por centímetro (S/cm), idéntica a las antiguas unidades mho/cm. Se mide principalmente en soluciones acuosas que contienen iones, es decir partículas cargadas formadas por la disociación de ácidos, bases, sales o ciertos gases como el dióxido de carbono.

La conductividad eléctrica no es específica, una solución con cualquier tipo de iones presentes puede transportar corriente eléctrica. Para determinar concentración mediante una medición de conductividad, es necesario que el usuario conozca mediante otro medio los componentes de la solución [18].

Constante de celda.

La conductividad específica compensa las variaciones en la geometría de la celda de conductividad multiplicando la conductividad medida por un factor llamado constante de celda. La constante de celda (k) es directamente proporcional a la distancia que separa las dos placas conductoras e inversamente proporcional a su área de superficie.

$$K = \frac{L}{a}$$

Donde a (área) = $A * B$

Conductividad específica = Conductividad medida (G) * Constante de celda (k) [19]

1.1.4 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es la medida de la acidez o alcalinidad de una solución acuosa. La acidez o alcalinidad está determinada por el número relativo de iones de hidrógeno (H^+) o hidroxilo (OH^-) presentes.

Sörenson, pH define al pH como el logaritmo negativo (base 10) de la concentración de iones H^+ , es decir:

$$pH = - \log [H^+]$$

Si la concentración de iones H^+ cambia por el factor de diez, el valor del pH cambia en una unidad.

A 25°C el valor de la constante de disociación (K_w) es de 10^{-14} o bien $p K_w=14$. Esta constante de disociación expresa el equilibrio entre los iones de hidrógeno e hidroxilo [20].

Medir el pH

Se utiliza un electrodo sensible al pH (usualmente de vidrio), un electrodo de referencia y un elemento de temperatura que proporcione la temperatura de la solución acuosa al analizador de pH. El electrodo de pH utiliza un vidrio sensible al pH, especialmente formulado para el contacto con la solución; éste desarrolla un potencial (voltaje) proporcional al pH de la solución. El electrodo de referencia está diseñado para mantener un potencial constante a cualquier temperatura dada, y sirve para completar el circuito de medición de pH dentro de la solución. Proporciona un potencial de referencia conocido para el electrodo de pH. La diferencia en los potenciales de los electrodos de pH y de referencia proporciona una señal de milivoltios proporcional al pH, el analizador de pH relaciona la señal de milivoltios con el pH [18].

Un electrodo de pH de vidrio y un electrodo de referencia, en combinación con un analizador de pH, proporcionan un circuito de medición de pH completo. En combinación, proporcionan una señal de milivoltios que es proporcional al pH. Sin embargo, los potenciales de milivoltios producidos por los electrodos de referencia y pH dependen de la temperatura.

Por otro lado, los sensores de pH están casi siempre diseñados para tener un valor isopotencial de pH de 7.0 pH y un valor isopotencial de potencial de 0mV. Usando el punto isopotencial compensa/corrigie el valor de pH a cualquier temperatura tomando

como referencia una temperatura de 25°C, usando una señal de temperatura. Este punto isopotencial es el punto donde el potencial es constante con la temperatura [18].

1.2 Marco teórico

1.2.1 Mecánica de Fluidos [21]

Ecuación de continuidad

El método empleado para calcular la velocidad del flujo de un fluido en un sistema de tuberías cerrado depende del principio de continuidad. Un fluido fluye desde la sección 1 hasta la sección 2 a una velocidad constante. Es decir, la cantidad de fluido que fluye a lo largo de cualquier sección en una cantidad de tiempo dada es constante.

Ecuación de continuidad para líquidos

$$A_1V_1 = A_2V_2$$

O bien, puesto que $Q = Av$, se tiene

$$Q_1 = Q_2$$

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Cada término es una forma de la energía que posee un fluido por unidad de peso del fluido que fluye en el sistema. Esta explica los cambios en la carga de elevación, la carga de presión y la carga de velocidad entre dos puntos de un sistema de flujo de fluidos. Supone que no hay pérdidas ni adiciones de energía entre los dos puntos, por lo que la carga total permanece constante.

$\frac{P}{\gamma}$ se llama carga de presión

z se llama carga de elevación

$\frac{v}{2g}$ se llama carga de velocidad

A la suma de estos tres términos se denomina carga total.

Tanques, depósitos y boquillas expuestos a la atmósfera

Cuando en un punto de referencia el fluido está expuesto a la atmósfera, la presión es cero y el término de la carga de presión puede cancelarse en la ecuación de Bernoulli.

Dos puntos de referencia están en la misma tubería

Cuando los dos puntos de referencia para la ecuación de Bernoulli están dentro de una tubería del mismo tamaño, los términos de la carga de velocidad son iguales en ambos lados de la ecuación y pueden ser cancelados.

Ecuación General De La Energía

La ecuación general de la energía que se utiliza es una ampliación de la ecuación de Bernoulli, la cual permite resolver problemas en los que se producen pérdidas y ganancias de energía. Las pérdidas y ganancias de energía producidas en un sistema se considerarán en términos de la energía por unidad de peso del fluido que fluye en el sistema.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

h_A = Energía añadida al fluido mediante un dispositivo mecánico como una bomba.

h_R = Energía removida del fluido mediante un dispositivo mecánico como un motor de fluido.

h_L = Pérdidas de energía del sistema debido a la fricción en tubería o pérdidas menores debido a válvulas y accesorios.

Potencia requerida por las bombas

La potencia es la rapidez a la que se transfiere energía.

$$P_A = h_A \gamma Q$$

donde P_A indica la potencia añadida al fluido, γ representa el peso específico del fluido que fluye por la bomba y Q es la rapidez del flujo de volumen o gasto volumétrico.

Número de Reynolds—Secciones circulares

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{vD}{\nu}$$

Donde ρ indica la densidad del fluido, ν la viscosidad del fluido, D el diámetro de la tubería y v la velocidad promedio del flujo.

Los flujos que tienen un número de Reynolds grande, por lo general debido a su alta velocidad y/o baja viscosidad, tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos que tienen alta viscosidad y/o se mueven a bajas velocidades tendrán números de Reynolds bajos y tenderán a ser laminares.

Si $N_R < 2000$, el flujo es laminar

Si $N_R < 4000$, el flujo es turbulento

Ecuación de Darcy para la pérdida de energía

La ecuación de Darcy puede utilizarse para calcular la pérdida de energía debida a la fricción en las secciones rectas y largas de tubería redonda, tanto para el flujo laminar como para el turbulento.

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde

h_L =perdida debida a la fricción (m)

L = Longitud de la corriente de flujo (m)

D = Diámetro de la tubería (m)

v =velocidad de flujo promedio (m/s)

f =factor de fricción (adimensional)

Factor de fricción para el flujo laminar

$$f = \frac{64}{N_R}$$

Factor de fricción para el flujo turbulento

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\mathcal{E}} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde \mathcal{E} es el coeficiente de rugosidad del material de la tubería.

1.2.2 Sistema de control difuso

Un controlador difuso simple puede representarse mediante un diagrama de bloques como el que se muestra en la Figura 10.

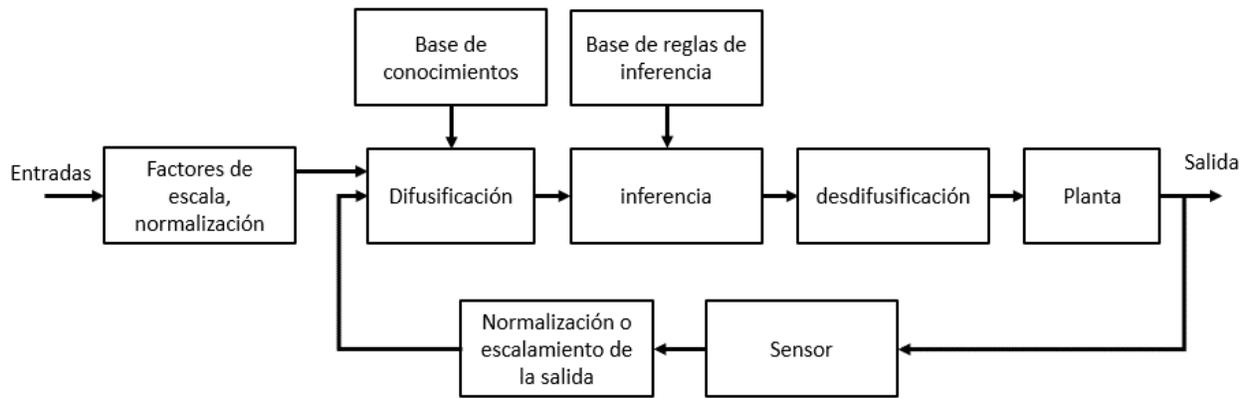


Figura 10 Diagrama a bloques de un sistema de control difuso simple

El módulo de “base de conocimientos” de la Figura 10 contiene la información de las funciones de membresía de entrada (que serán las variables de entrada al proceso de inferencia) y los conjuntos difusos de salida, que serán las variables o acciones de control sobre la planta [22].

Proceso de inferencia de Mamdani

El sistema de inferencia difusa por el método de Mamdani permite algunas variaciones, hay diferentes operadores T-norma para la intersección y varios métodos de desdifusificación, de modo que aquí se describen los pasos del proceso considerados en el desarrollo de este proyecto.

Difusificación

A un conjunto difuso o función de membresía se le nombra con letras mayúsculas “A, B, C” por ejemplo, y “x, y, z” a un objeto en el universo, de modo que se denomina “ $\mu_A(x)$ ” al grado de pertenencia del objeto “x” del conjunto “A”.

En la difusificación cada valor de entrada es evaluado en cada uno de los conjuntos difusos o funciones de membresía del universo que le corresponde, generando así sus grados de pertenencia o membresía.

Evaluación de reglas de inferencia difusa “si - entonces”

Cada regla contiene 2 operadores: *intersección* “y” y *agregación* “entonces”. La *intersección* puede resolverse aplicando un operador T-norma, el más común es “min” cuya notación se representa en la siguiente ecuación, que se refiere a seleccionar el grado de pertenencia mínimo de las entradas A y B en cada regla.

$$T_{min}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Para la *agregación* “entonces”, puede resolverse aplicando un operador S-norma, mediante el operador “max”, misma que consiste en seleccionar el grado de pertenencia máximo para cada función de membresía de cada salida.

$$S_{m\acute{a}x}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

La composición difusa conjunta más usada para para resolver las reglas de inferencia (intersección y agregación), es la composición max-min, cuyos valores resultantes se utilizan para recortar los conjuntos de salida, C1 y C2 en los universos de salida para obtener una curva de salida “CT” o corte total, que se obtiene de la unión de los conjuntos del universo de salida recortados.

$$\mu_{CT}(z) = \max\{\min[\mu_{C1}(z), \mu_{C2}(z)]\}$$

Desdifusificación

Este proceso se encarga de convertir el resultado difuso de la evaluación a un valor certero. El método de desdifusificación considerado de menor complejidad de implementación es el método de centroide del área, cuya ecuación descriptiva es la siguiente.

$$z^* = \frac{\sum \mu_{CT}(z)z}{\sum \mu_{CT}(z)}$$

donde z^* es el valor certero desdifusificado, que resulta de evaluar cada elemento z del universo de salida ponderado por su pertenencia en el conjunto difuso de salida “CT” [23].

1.3 Marco procedimental

1.3.1 Metodología

Se hace uso de la metodología VDI-2206 [24], mostrada en la Figura 11 ya aplicada al presente trabajo. Es una técnica instaurada en el año 2004 por el consejo de ingenieros alemanes que consta de las siguientes etapas principales:

- Diseño del sistema.
- Diseño del dominio específico.
- Integración del sistema.
- Modelado y simulación.
- Validación y verificación.

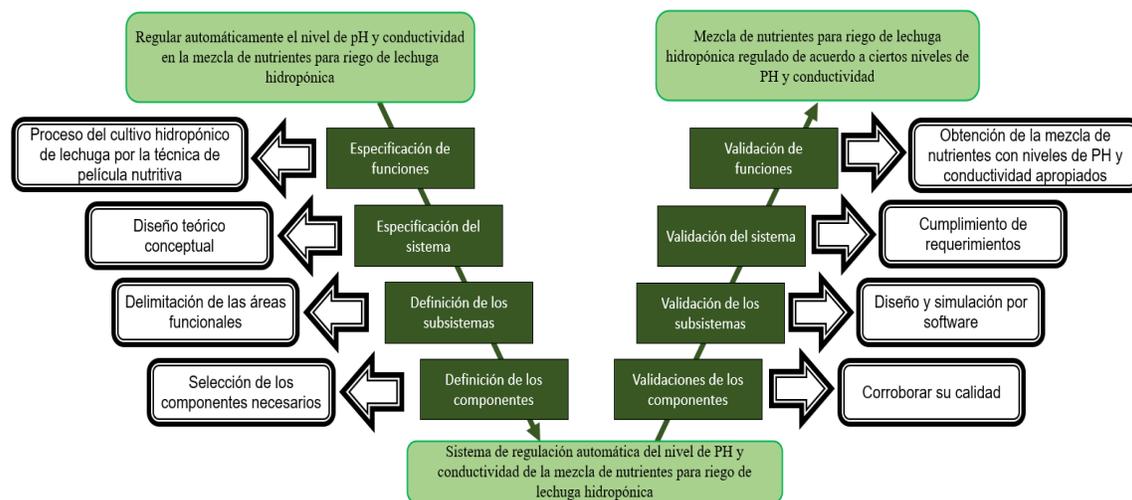


Figura 11 Esquema de la metodología V aplicada al presente trabajo

1.3.2 Despliegue de la función de calidad QFD

Se debe establecer una relación entre las necesidades y los requerimientos. Para ello se realiza el despliegue de la función de calidad “QFD”, por sus siglas en inglés “Quality Function Deployment” [25]. En el QFD se asigna una ponderación a las necesidades del cliente, mismas que se pueden ubicar en tres niveles que se entienden como muy importante (9), importante (3) y poco importante (1). Así mismo, se tiene una escala que indica el nivel de relación de los requerimientos con las necesidades, fuerte (9), moderada (3) y débil (1). En la parte superior de los requerimientos se coloca una flecha con trayectoria ascendente o descendente, dependiendo de la dirección de la calidad para que aumente. En conjunto a esto, en la parte superior o “techo” se encuentran recuadros en los cuales se puede poner “+” si la correlación es positiva y “-” cuando la correlación es negativa.

1.3.3 Herramienta multicriterio AHP

La herramienta multicriterio AHP [26], permite analizar que solución de múltiples soluciones definidas cumple de forma adecuada con los distintos criterios de selección planteados, los cuales cuentan con una ponderación de acuerdo con su importancia. Esto permite determinar la solución a escoger.

En primera instancia se presenta una matriz de tamaño $N \times N$ en la que se acomodan los N criterios en filas y columnas y se les asigna una importancia relativa uno respecto de otro, por lo que la diagonal principal tiene como valor “1”, resultante de la comparación de un criterio por sí mismo. Dicha matriz se normaliza para poder obtener el vector de prioridad que sirve de herramienta para poder discernir entre el vector prioridad de los criterios comparados con la solución en sí y poder realizar un análisis de los resultados para distinguir la solución que cumpla de forma más adecuada con los criterios de selección. Una vez hecho esto obtenemos el vector de prioridad de cada criterio con

respecto a la solución, mismo que se multiplica con su peso específico (vector de prioridad de la matriz normalizada), para poder obtener un valor resultante para cada solución que será el que defina que solución cumple de mejor manera con los criterios planteados.

1.3.4 Selección de materiales

Para la selección de materiales se siguieron los métodos instaurados por Ashby [27], en el capítulo 5, que permiten determinar un conjunto de materiales útiles para una aplicación dependiendo del tipo de carga o función a desempeñar por un elemento. El proceso que se sigue es el siguiente:

1. Definir las funciones para que cumpla el rendimiento
2. Definir los requerimientos de manufactura
3. Comparar las características en bases de datos
4. Investigar a los candidatos
5. Pruebas y estándares

Se deben de realizar varios pasos para completar todo el proceso anteriormente enlistado, estos pasos consideran los requerimientos y necesidades planteados.

1. Se traducen las características y necesidades de la aplicación en requerimientos y rendimiento del material.
2. Se delimitan los atributos del material y se eliminan los materiales que no cumplan con dichos límites.
3. Se identifican gráficas con los materiales que están dentro de los límites y se generan guías de selección dentro de las gráficas
4. Estos materiales se investigan de forma detallada.
5. Se aplica alguna tabla de decisión para determinar el material más adecuado

Para poder realizar todo el proceso, se utilizó el software CES Edupack 2019 para obtener todas las gráficas de las características de los materiales, para tomar otros criterios como costo, densidad de cada material y más información que se tomaron en cuenta para su selección.

1.3.5 Selección de procesos

Para la selección de procesos de manufactura se siguió el método descrito por Ashby [27] en el capítulo 13, en el que se toman en cuenta la función, la forma y el material a procesar, y en el que la selección se hace a través de un análisis de las siguientes etapas:

- Proceso contra material
- Proceso contra forma
- Proceso contra masa
- Proceso contra sección
- Proceso contra tolerancia

- Proceso contra rugosidad de la superficie
- Proceso contra costo

Estas etapas sirven para seleccionar los métodos de conformado, unión y acabado. Una vez evaluadas las etapas mencionadas anteriormente, se llega a una solución para el proceso, o un conjunto de soluciones, las cuales son adecuadas para el tipo de elemento a procesar.

1.3.6 Análisis de elemento finito

El análisis de elemento finito, comúnmente llamado FEA, es un método de análisis numérico utilizado para resolver problemas en distintas disciplinas de ingeniería. Un FEA es la herramienta más común para el análisis estructural y de tensión [28]. El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema [29].

Mallado

El concepto básico detrás del FEA es reemplazar cualquier forma compleja con la unión (o suma) de una gran cantidad de formas muy simples (como triángulos) que se combinan para modelar correctamente la pieza original. Las formas más pequeñas y simples se denominan elementos finitos (FE) porque cada uno ocupa un subdominio pequeño pero finito de la parte original. Se conectan entre sí en puntos llamados nodos. El proceso de transformación del modelo de cuerpo sólido en un modelo de FE se denomina mallado [30].

El software formula una serie de ecuaciones algebraicas por sí solo, uniéndolas en una ecuación matricial dispersa a través de las conexiones entre los elementos, las propiedades materiales del cuerpo, las restricciones y las cargas. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión de los Métodos dos Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis [31].

Esfuerzos de Von Mises

El esfuerzo de Von Mises también conocido como esfuerzo de Huber es una medida que abarca las 6 componentes del esfuerzo en el espacio tridimensional, considerando 2 componentes de esfuerzo cortante y una de esfuerzo normal, que se encuentran presentes en cada lado del cubo (Figura 12). La tensión de von Mises, tiene la propiedad de ser un número (un escalar) que se obtiene combinando todas las tensiones en el

espacio (tensiones en las direcciones x, y, z) [32]. Por simetría, el estado de esfuerzos tridimensional es caracterizado por las componentes σ_x , σ_y , σ_z y $\tau_{xy}=\tau_{yx}$, $\tau_{yz}=\tau_{zy}$, $\tau_{xz}=\tau_{zx}$.

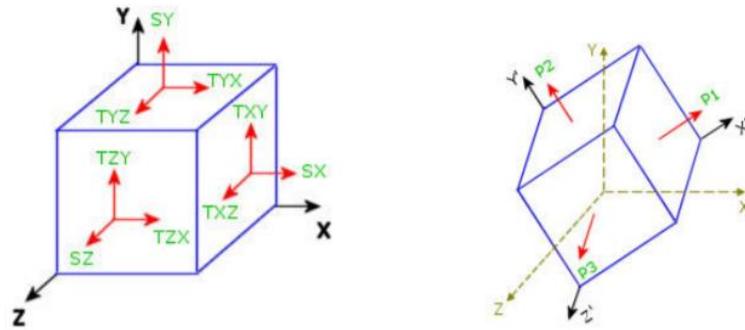


Figura 12 Tensor de tensión (izquierda) y sus principales valores normales [28]

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0.5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Las tensiones se pueden utilizar para calcular el criterio de falla escalar de von Mises. Las tensiones normales principales también se pueden utilizar para calcular el criterio de falla de von Mises.

Sirve para saber si un material se va a romper con las cargas a las que va a ser sometido. El esfuerzo efectivo de von Mises se compara con la tensión máxima admisible por el material, esta puede ser la correspondiente al límite elástico.

Deformación unitaria

Podemos definir la deformación unitaria [33] como el cambio de longitud por unidad de longitud (deformación unitaria normal) o como el cambio en el ángulo entre dos líneas sobre materiales que se encontraban inicialmente perpendiculares entre sí (deformación unitaria cortante). La deformación unitaria normal es una cantidad adimensional, ya que es un cociente entre longitudes, sin embargo, se acostumbra, como práctica común, emplear una relación entre unidades de longitud (micrómetro/metro, m/m), en el caso de la deformación unitaria cortante, ésta se mide en grados o radianes.

$$e = \frac{\Delta l}{l_{inicial}}$$

Desplazamiento URES

El desplazamiento (URES) [34] es la magnitud del vector \vec{U} o vector de desplazamientos, que está compuesto por los movimientos en los tres ejes coordenados \vec{U}_x , \vec{U}_y y \vec{U}_z definida por:

$$URES = |\vec{U}| = \sqrt{\vec{U}_x^2 + \vec{U}_y^2 + \vec{U}_z^2}$$

Capítulo 2. Diseño del sistema

2.1 Diseño conceptual

En la sección 1 se establecen las necesidades que el sistema debe satisfacer a partir de las cuales se determinan las funciones a realizar, para las cuales se propuso una arquitectura física general basada en módulos y sistemas que de manera conjunta puedan llevar a cabo dichas funciones a fin de llegar a un concepto solución.

2.1.1 Necesidades y requerimientos

De acuerdo con la metodología VDI-2206 [24], para la construcción y elaboración de la propuesta de solución, se necesita definir los requerimientos iniciales con la finalidad de lograr el cumplimiento de las funciones que realiza o requiere el objeto de estudio.

Los requerimientos iniciales fueron obtenidos de las necesidades que planteó el señor Juan Martínez, productor local de lechugas hidropónicas en la delegación Tláhuac, CDMX, al proporcionar información sobre cómo lleva a cabo el proceso hidropónico.

Necesidades

Las necesidades se plantean de manera ambigua para ser establecidas como requerimientos técnicos posteriormente. Es importante recordar que estas pueden verse influenciadas por otros objetivos que cambian en el transcurso del tiempo.

De forma general se plantearon las necesidades mostradas en la Tabla 2, las cuales se agruparon en funcionales y no funcionales, las primeras afectan directamente la realización de la actividad para la cual se plantea el sistema; las segundas son complementarias ya que no influyen directamente en el cumplimiento de la función principal.

Tabla 2 Necesidades del sistema

Necesidades			
Funcionales		No funcionales	
N1	Medir el PH de la solución nutritiva	N9	El sistema de control se puede instalar en diversas

			infraestructuras de plantaciones hidropónicas de lechuga por medio de NFT
N2	Mantener el PH de la solución nutritiva en el rango establecido	N10	Implementación de software libre
N3	Medir la conductividad de la solución nutritiva	N11	Interfaz gráfica para reportar pH, conductividad y variables ambientales (temperatura y humedad)
N4	Mantener los valores de conductividad en el valor establecido de acuerdo con la semana correspondiente del crecimiento de la lechuga	N12	Resistente a condiciones ambientales moderadas
N5	Suministrar la solución nutritiva a las lechugas	N13	Fácil mantenimiento y reparación
N6	Dar aviso cuando se deban rellenar los contenedores de las soluciones		
N7	Reportar valores de las variables pH, conductividad y ambientales (temperatura y humedad)		
N8	Tener suficientes contenedores para las diversas soluciones a utilizar		

Requerimientos

Se procedió a especificar y describir de forma precisa al objeto definido anteriormente, determinando los requerimientos que se muestran en la Tabla 3. Estos requisitos establecieron un punto de comparación con el que fue evaluado posteriormente el sistema que se plantea en el presente trabajo.

Tabla 3 Requerimientos del sistema

Requerimientos			
No.	Característica	Escala	Demanda o deseo
R1	Dimensiones del prototipo a escala		
R1.1	Largo	≤ 1.5 m	Demanda
R1.2	Ancho	≤ 1 m	Demanda
R1.3	Altura	≤ 1.5 m	Demanda
R2	Peso del prototipo a escala	≤ 25 kg	Deseo
R3	Cantidad de lechugas por cultivo	> 15 Unidades	Deseo
R4	Dimensiones del sistema de control		
R4.1	Largo	≤ 1.5 m	Demanda
R4.2	Ancho	≤ 1 m	Demanda
R4.3	Altura	≤ 1.5 m	Demanda
R5	Diseñado para colocarse y removerse	-	Deseo
R6	Valor del pH	6.0 a 6.5	Demanda
R7	Valor de conductividad	1.4 a 1.7 mS/cm	Demanda
R8	Interfaz gráfica	-	Demanda

R8.1	Mostrar el último valor tomado de las variables pH, conductividad y ambientales	-	Demanda
R9	Fuente de alimentación	120-127V	Demanda
R10	Material externo resistente del sistema de control	-	Demanda
R10.1	Resistente a condiciones climáticas de la CDMX	*Temperatura: poco mayor a 25° y la más baja a 5° *Clima templado subhúmedo (87%) [35]	Demanda
R10.2	Oscuro	-	Deseo
R10.3	Inerte a las soluciones a utilizar	-	Demanda
R11	Ciclos de operación	1 ciclo cada 2 horas	Deseo
R12	Protección del sistema		
R12.1	Protección eléctrica	-	Demanda
R12.2	Proteger del agua y humedad	-	Demanda

Los valores de pH y de conductividad eléctrica ideales en la solución nutritiva de riego para el desarrollo de lechugas hidropónicas fueron obtenidos del manual de hidroponía [36]. Estos coinciden con los valores que proporcionó el productor local.

Despliegue de la función de calidad QFD

Habiendo establecido las necesidades y requerimientos del sistema fue necesario verificar una relación existente entre estas. Para ello se optó por realizar el despliegue de la función de calidad “QFD”, por sus siglas en inglés “Quality Function Deployment” herramienta descrita por Short M. en [25] en su versión de casa de calidad.

En la Figura 13 se ilustran las ponderaciones para la realización del QFD.

Dirección de la calidad	Correlaciones	Relaciones	Importancia del cliente
<ul style="list-style-type: none"> • Valor aumenta ↑ • Valor disminuye ↓ 	<ul style="list-style-type: none"> • Positiva ⊕ • Negativa ⊖ 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerte (9) ● • Moderada (3) ○ • Débil (1) ▽ 	<ul style="list-style-type: none"> • Muy importante (9) • Importante (3) • Poco Importante (1)

Figura 13 Escalas para el QFD

En la Figura 14, se muestra el despliegue de la función de calidad para el trabajo a desarrollar. En dicha figura, se observan los resultados obtenidos y se aprecia que los requerimientos R10 Ciclos del sistema, R6 Valor PH, R7 Valor de conductividad, son los 3 requerimientos que requieren mayor atención para que el sistema cumpla con los requerimientos más importantes marcados por el usuario final.

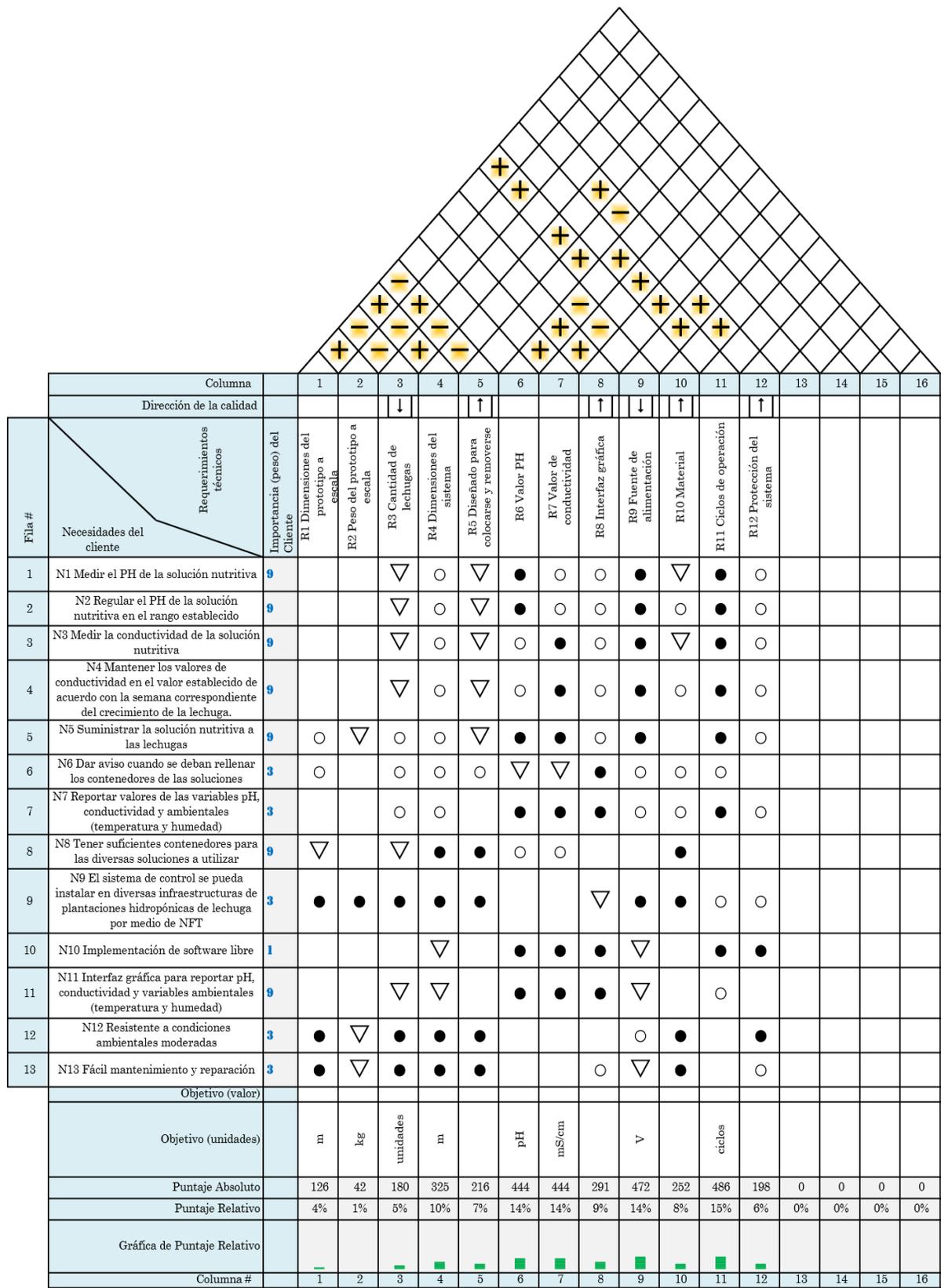


Figura 14 Despliegue de la función de calidad QFD

2.1.2 Arquitectura del sistema

Arquitectura Funcional

Modelo jerárquico FBS

Continuando con la descripción del sistema, es necesario listar y organizar jerárquicamente las funciones que el sistema debe realizar. Esto se llevó a cabo con base en la estructura del dispositivo mecatrónico que propone Bishop [37]. Se determinaron funciones generales que engloban el comportamiento del sistema o son funciones genéricas de un sistema. Cada una de ellas se compone de subfunciones inherentes las cuales describen brevemente tareas específicas que el sistema debe realizar. Se enlistan las funciones en el siguiente orden:

- **F1** Manipular la solución nutritiva:

Modificar los valores de pH y CE de la solución nutritiva.

- **F1.1** Hacer circular la solución nutritiva:

Activar el actuador principal para suministrar solución nutritiva al sistema hidropónico.

- **F1.2** Agregar a la solución nutritiva un concentrado de nutrientes:

Activar el actuador secundario correspondiente para suministrar concentrado de solución nutritiva al contenedor principal.

- **F1.3** Agregar a la solución nutritiva agua:

Activar el actuador secundario correspondiente para suministrar agua al contenedor principal.

- **F2** Medir Parámetros:

Realizar la medición de las variables de interés para el usuario.

- **F2.1** Medir parámetros Internos:

Realizar la medición de las variables propias de la solución nutritiva, concentrado de solución nutritiva y agua.

- **F2.1.1** Medir el pH de la solución:

Obtener el valor del pH en la solución nutritiva para riego cuando se le indique al sistema.

- **F2.1.2** Medir la conductividad eléctrica en la solución:

Obtener el valor de la CE en la solución nutritiva para riego cuando se le indique al sistema.

- **F2.1.3** Monitorear el nivel de cada sustancia:

Registrar cuando el nivel de líquido en los contenedores correspondientes a la solución nutritiva, concentrado de solución nutritiva y agua haya bajado a cierto volumen.

- **F2.2** Medir parámetros externos:

Realizar la medición de las variables ambientales donde se encuentra colocado el sistema hidropónico.

- **F2.2.1** Medir la temperatura ambiente:

Obtener el valor de la temperatura ambiente cuando se le indique al sistema.

- **F2.2.2** Medir la humedad del ambiente:

Obtener el valor de la humedad ambiente cuando se le indique al sistema.

- **F2.2.3** Medir una referencia del tiempo real de operación:

Obtener una referencia del tiempo real de operación para tomar decisiones en el módulo de procesamiento.

- **F3** Controlar parámetros:

Determinar qué acciones debe realizar el sistema para establecer los valores deseados de pH y conductividad eléctrica.

- **F3.1** Controlar el nivel de pH:

Decidir de acuerdo con el valor obtenido de pH si el sistema debe agregar agua o concentrado de nutrientes.

- **F3.2** Controlar la conductividad eléctrica:
Decidir de acuerdo con el valor obtenido de CE si el sistema debe agregar agua o concentrado de nutrientes.
- **F4** Manejar la información:
Obtener, analizar y proporcionar datos de interés.
 - **F4.1** Acondicionar información:
Establecer las características requeridas de los datos a obtener o proporcionar en las diferentes tareas del sistema.
 - **F4.2** Procesar información:
Someter la información a algoritmos para realizar ciertas acciones.
 - **F4.3** Almacenar información:
Guardar los valores de las variables de interés para el usuario.
- **F5** Comunicar al sistema:
Intercambiar información.
 - **F5.1** Comunicar internamente:
Intercambiar información entre los elementos que conforman el sistema de control.
 - **F5.2** Mostrar al usuario los parámetros:
Proporcionar información relevante al usuario sobre las condiciones ambientales del sistema y las variables correspondientes a la solución nutritiva, concentrado de solución y agua.
- **F6** Gestionar la energía:
Proporcionar la o las fuentes necesarias para cubrir la demanda eléctrica del sistema.
 - **F6.1** Acondicionar energía:
Asegurar que la energía proporcionada cumpla con las características demandadas por los componentes eléctricos y electrónicos del sistema.

- **F6.2** Distribuir energía:

Proporcionar energía a cada uno de los componentes que lo necesiten.

- **F7** Proteger al sistema:

Considerar factores internos y externos que podrían afectar al funcionamiento del sistema.

- **F7.1** Proteger eléctricamente:

Contrarrestar factores eléctricos que pudieran dañar al sistema.

- **F7.2** Proteger del agua:

Contrarrestar los riesgos posibles que pueden presentarse por la presencia de líquidos.

De una forma gráfica, en la Figura 15 se muestra el modelo jerárquico de funciones FBS (function breakdown structure por sus siglas en inglés). Éste representa como se descomponen las funciones del sistema.

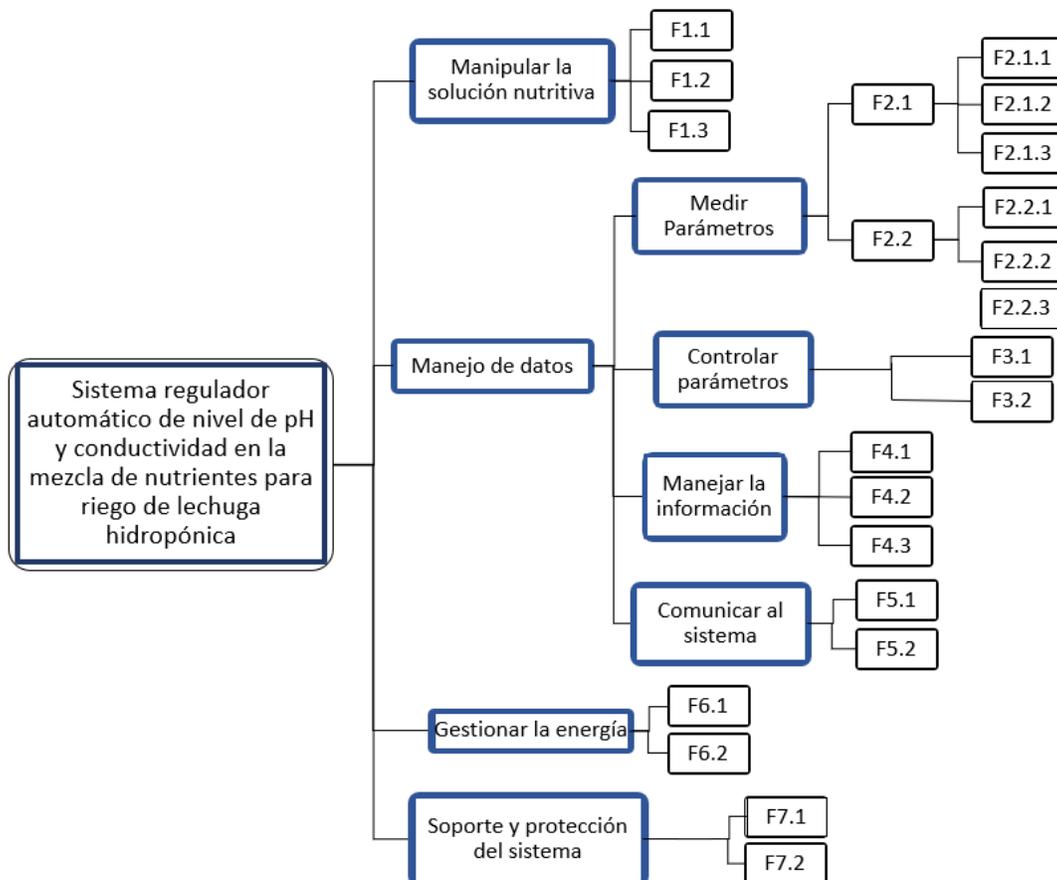


Figura 15 Arquitectura funcional

Validación de módulos o Matriz de trazabilidad funciones-requerimientos

La Tabla 4 muestra la matriz de trazabilidad utilizada para validar que cada una de las funciones del sistema satisfaga o esté asociada a alguno de los requerimientos planteados.

Tabla 4 Matriz de trazabilidad de funciones-requerimientos

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
F1.1	✓	✓	✓		✓					✓	✓	
F1.2	✓	✓			✓					✓	✓	
F1.3	✓	✓			✓					✓	✓	
F2.1	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	
F2.1.1	✓	✓			✓	✓		✓		✓	✓	
F2.1.2	✓	✓			✓		✓	✓		✓	✓	
F2.1.3	✓	✓			✓			✓		✓	✓	
F2.2	✓	✓			✓			✓		✓	✓	
F2.2.1	✓	✓			✓			✓		✓	✓	
F2.2.2	✓	✓			✓			✓		✓	✓	
F2.2.3	✓	✓									✓	
F3.1						✓					✓	
F3.2							✓				✓	
F4.1				✓		✓	✓	✓			✓	
F4.2				✓		✓	✓	✓			✓	
F4.3				✓		✓	✓	✓			✓	
F5.1						✓	✓	✓			✓	
F5.2						✓	✓	✓			✓	

F6.1									✓			✓
F6.2									✓			✓
F7.1												✓
F7.1.1												✓
F7.1.2												✓

Para poder mantener los niveles de pH (R6) y CE (R7) en la solución nutritiva de riego, dentro de los rangos adecuados es necesario que el sistema realice las mediciones de dichas variables (F2.1.1 y F2.1.2) cada determinado tiempo (R11 y F2.2.3). El sistema debe procesar las mediciones obtenidas (F4.2) para establecer si es necesario agregar agua o concentrado de nutrientes (F2, F1.1 y F1.2) a la solución nutritiva de riego activando los componentes necesarios (F5.1). Estas funciones dependen de la cantidad de lechugas presentes en el sistema hidropónico (R3) debido a que entre mayor capacidad tenga, mayor es la frecuencia con la que se tienen que realizar dichas funciones, ya que se presentan modificaciones más abruptas y con mayor frecuencia en las condiciones de la solución nutritiva de riego.

Dado que el usuario necesita poder visualizar el pH, CE, así como la temperatura y humedad del ambiente, para monitorear que el estado de la solución nutritiva que circula en los canales y las condiciones ambientales donde se encuentran su sistema hidropónico son las adecuadas (R8) el sistema debe obtener los valores de dichas variables (F2), procesarlas o almacenarlas (F4) y comunicarlas a través de una interfaz gráfica que el usuario sepa interpretar (F5.2).

El sistema hidropónico involucra el manejo de sustancias líquidas por lo que es muy importante que la estructura, los contenedores de la solución, concentrado y agua, la carcasa del sistema de control, así como los componentes de este, cuenten con protección a líquidos, sean inertes a las soluciones y soporten las condiciones climáticas del lugar donde se va a establecer (R10, R12, F7.2). El sistema de control debe unificarse con la estructura hidropónica (R4, R1 y R2) para realizar las funciones correspondientes (F1, F2, F3, F4, F5, F6) y al mismo tiempo removerse en caso dado de requerir mantenimiento (R5).

El sistema regulador automático debe conectarse a una fuente de alimentación (R9) para poder suministrar energía (F6) a todos los componentes que realizan las funciones involucradas en el proceso de regulación y monitoreo de variables. Los componentes deben contar con protección eléctrica (F7.1, R12) para garantizar el buen funcionamiento de sistema.

IDEF 0

Es una técnica de modelado utilizada para desarrollar representaciones gráficas de un sistema o área. El uso del IDEF0 [38] permite generar modelos que engloban acciones, procesos u operaciones, así como sus relaciones funcionales. Un modelo IDEF0 tiene niveles jerárquicos abarcando el sistema global hasta llegar a las unidades funcionales. Se necesita plantear entradas, salidas, herramientas y parámetros de control.

Entradas

Generales

- A1-E1 Solución nutritiva
- A1-E2 Concentrado de nutrientes
- A1-E3 Agua
- A2-E4 127 V a 60 Hz
- A4-E5 Sistema sin protección

Submodelos

- A3-E6 Datos reales

Control

Generales

- A1-C1 Valor de pH deseado
- A1-C2 Valor de conductividad deseado
- A2-C3 Potencia eléctrica
- A3-C4 Temperatura ambiente
- A3-C5 Humedad del ambiente
- A3-C6 Estrategia de control

Submodelos

- A1-C7 Errores de manipulación
- A4-C8 Señales de control

Herramientas

Generales

- A1-H1 Actuadores
- A1-H2 Sensor de pH
- A1-H3 Sensor de conductividad

- A1-H4 Sensor de temperatura
- A1-H5 Sensor de humedad
- A2-H6 Dispositivo de carga eléctrica
- A3-H7 Dispositivo de procesamiento
- A3-H8 Dispositivo de comunicación
- A3-H9 Reloj externo.
- A4-H10 Protección eléctrica
- A4-H11 Protección contra el agua

Submodelos

- A1-H12 Energía eléctrica acondicionada

Salidas

Generales

- A1-S1 Solución nutritiva manipulada
- A3-S2 Información del nivel de las sustancias
- A3-S3 Reporte de las variables ambientales
- A4-S4 Sistema Protegido

Submodelos

- A1-S5 Datos reales
- A2-S6 Energía eléctrica acondicionada
- A3-S7 Errores de manipulación
- A3-S8 Señales de control

En los diagramas IDEF0 se puede observar de forma general el modelo descriptivo del sistema, los subsistemas y módulos que lo componen en sus respectivos niveles de jerarquía. Las entradas, herramientas, parámetros de control y salidas descritas con anterioridad se representan gráficamente su conexión e interacción con cada una de las subfunciones.

En la Figura 16, se presenta el modelo para A0 como función, con todas las entradas, salidas, implementación de control y las herramientas desde un apartado general. En esta figura se representa el diagrama de más alto nivel por lo que es muy general, el nombre del recuadro “Manipular la solución nutritiva en el sistema hidropónico de lechugas” nos indica de que trata el sistema, cual es el objetivo. Además, se muestran las entradas que se van a tener, el conjunto de las herramientas y los parámetros de control que se utilizarán para finalmente obtener las salidas deseadas.

La función única representada en la Figura 16 se descompone en sus principales subfunciones creando un diagrama hijo, representado en la Figura 17 lo cual permite tener un mayor detalle del sistema. En esta figura se muestran A1, A2, A3 y A4 que son cajas hijas ya que describen a un diagrama padre (A0). Cada una de estos rectángulos o cajas son las funciones que permiten realizar todas las tareas que se desea con el sistema. Dichas funciones pueden listarse como: manipular la solución nutritiva, gestionar la energía, manejar datos y proteger al sistema respectivamente. Además, cada una de ellas tiene sus propias entradas, herramientas, parámetros de control y sus salidas para comprender mejor que entrada es de que subfunción y como hay salidas que son las entradas de otra subfunción.

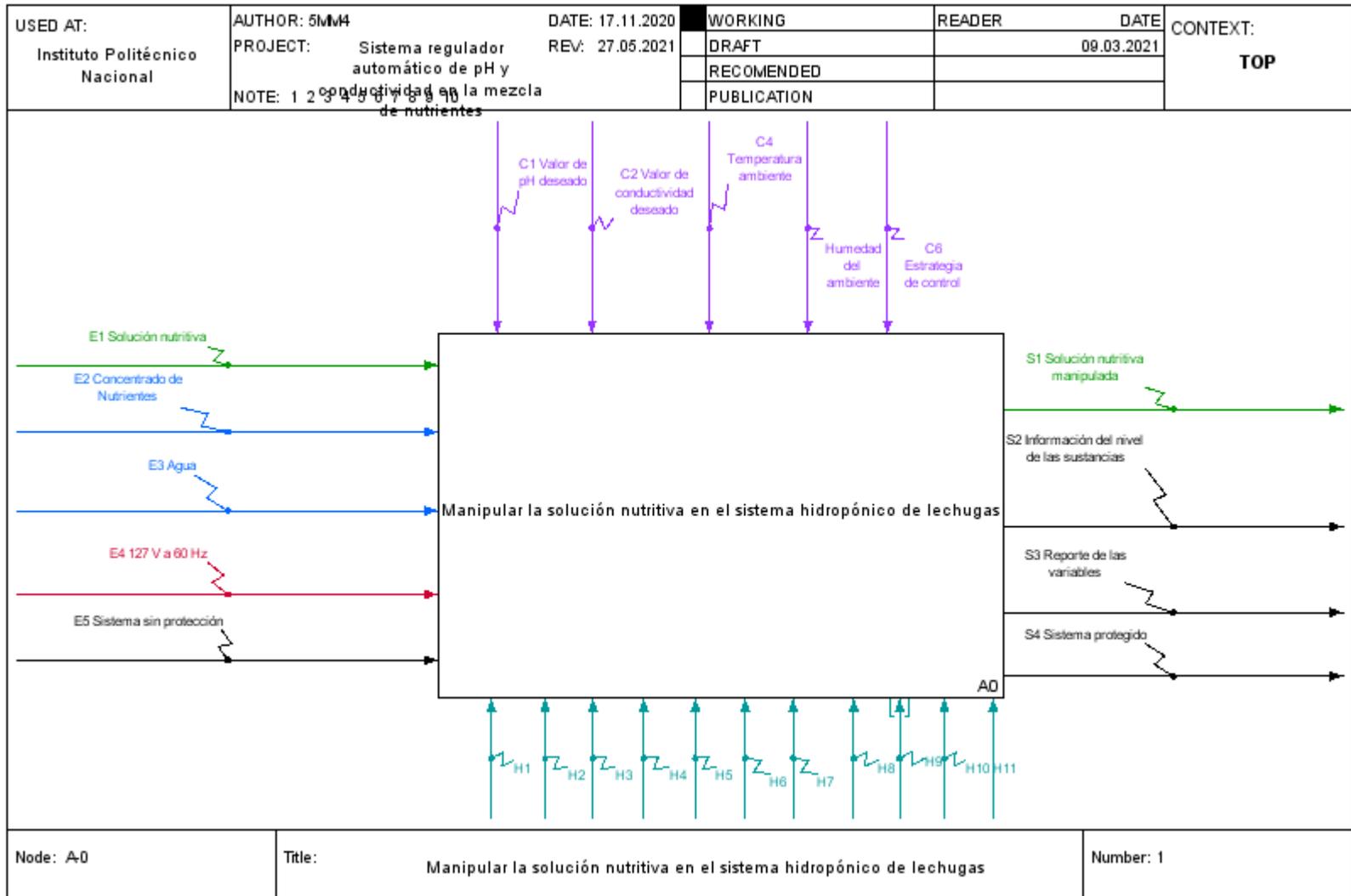


Figura 16 A0 como función

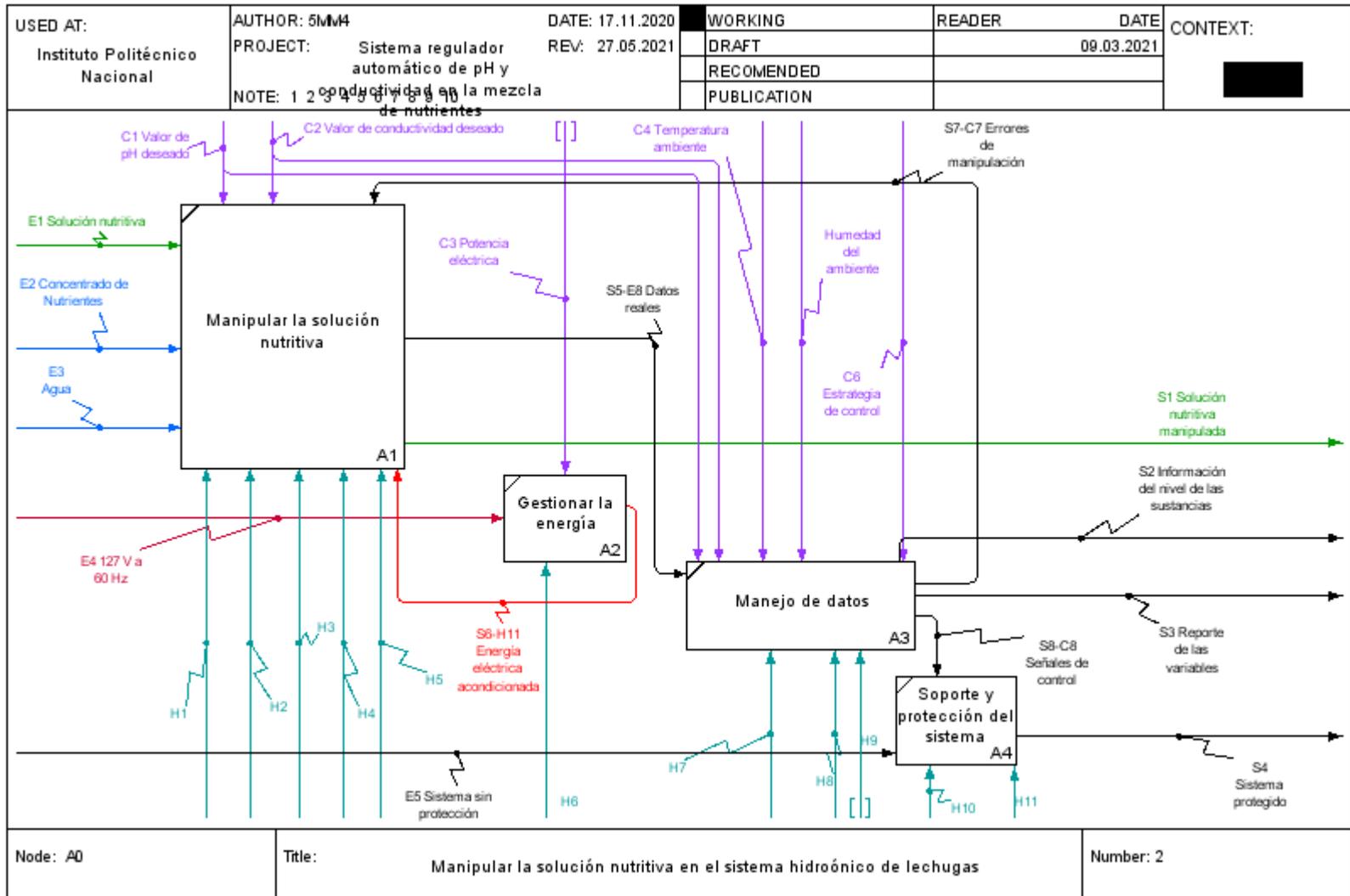


Figura 17 A0 expandido

Arquitectura Física

Una vez analizado el comportamiento del sistema mediante sus funciones es posible inferir los elementos físicos necesarios para llevarlas a cabo, los cuales fueron agrupados en los siguientes sistemas con sus correspondientes módulos.

S1 Manejo de solución

M1 Flujo de solución:

Actuador que se encarga de hacer fluir la solución nutritiva a través de toda la estructura tubular que alimenta a las plantas y el actuador que se encarga de fluir la solución dentro del contenedor principal a fin de promover la oxigenación del agua.

M2 Concentración de solución:

Actuadores que regulan la concentración de nutrientes y agua, en el contenedor de la solución nutritiva.

S2 Energético:

Circuitos que adaptaran la energía que entra al sistema a la demanda energética específica de cada componente.

S3 Información

M3 Medición:

Sensores que permitirán al sistema conocer las condiciones de la solución y del entorno a fin de obtener los parámetros que le permitirán tomar decisiones.

M4 Procesamiento:

Dispositivo electrónico que analiza la información, toman decisiones, envía órdenes a los actuadores e información al módulo de comunicación.

M5 Comunicación:

Elementos que faciliten la transmisión de información.

M6 Interfaz:

Medio de comunicación del usuario con la información proporcionada por el sistema, no está considerada dentro del sistema estructural, pero es parte importante del sistema de comunicación.

S4 Estructural:

Es el soporte y protección principal de los componentes que conforman el sistema.

Estos módulos y sistemas se representan de manera gráfica en la Figura 18

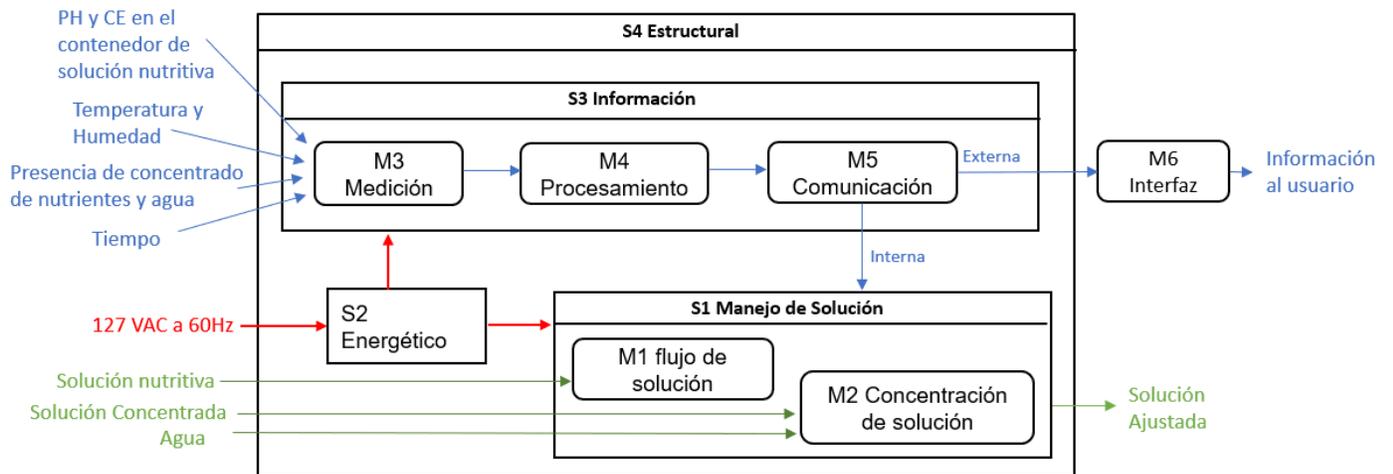


Figura 18 Arquitectura Física

Validación de módulos o Matriz de trazabilidad funciones-módulos

La Tabla 5 muestra la matriz de trazabilidad utilizada para validar los módulos propuestos comprobando que cada una de las funciones es realizada o se asocia a alguno de estos.

Tabla 5 Matriz de trazabilidad

	S1	M1	M2	S2	S3	M3	M4	M5	S4	M6
F1.1	✓	✓		✓					✓	
F1.2	✓		✓	✓					✓	
F1.3	✓		✓	✓					✓	
F2.1				✓	✓	✓			✓	
F2.1.1				✓	✓	✓			✓	
F2.1.2				✓	✓	✓			✓	
F2.1.3				✓	✓	✓			✓	
F2.2				✓	✓	✓			✓	
F2.2.1				✓	✓	✓			✓	
F2.2.2				✓	✓	✓			✓	
F2.2.3				✓	✓	✓			✓	

F3.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
F3.2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
F4.1				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F4.2				✓	✓		✓		✓	
F4.3				✓	✓		✓		✓	
F5.1				✓	✓			✓	✓	
F5.2				✓	✓			✓	✓	✓
F6.1				✓					✓	
F6.2				✓					✓	
F7.1				✓					✓	
F7.1.1				✓					✓	
F7.1.2				✓					✓	

Se puede apreciar que los sistemas S2 y S4 involucran a la mayoría de la funciones debido a que para ser realizadas es fundamental que se cuente con la energía necesaria (F6.2) y que esta tenga las características que cada uno de los módulos que conforman al sistema requieren (F6.1) para lograr el correcto funcionamiento de sus componentes y contrarrestar factores eléctricos que pudieran dañarlos (F7.1). Por otra parte, los componentes involucrados en el sistema regulador necesitan integrarse a la estructura hidropónica de modo que se puedan llevar a cabo todas las funciones que se requieren, teniendo en cuenta la protección de estos por la presencia de líquidos (F7.2)

Para regular la solución nutritiva de riego (S1) es necesario que previamente se realice la medición de los parámetros internos (F2.1) es decir la medición del pH (F2.1.1) y CE (F2.1.2) así como el monitoreo del nivel de solución presente en los contenedores de agua y concentrado de solución (F2.1.3). Por otra parte, se realizan mediciones de parámetros externos como la humedad (F2.2.2) y temperatura (F2.2.1) del ambiente que son de interés para el usuario, así como del tiempo real para la toma de decisiones en el sistema (F2.2.3). Dichas funciones conforman a M3, los datos obtenidos de cada uno de los elementos que realizan mediciones o monitoreo son procesados, interpretados (F4.2) y almacenados en M4.

Las instrucciones resultantes de los algoritmos empleados, las decisiones que toma el sistema, así como los datos de interés para el usuario dados por M4 son comunicadas a S1 (F5.1) y M6 (F5.2) a través de M5. La comunicación de M5 con S1 se realiza de manera interna es decir con componentes físicos involucrados en el sistema hidropónico, mientras que la conexión con M6 la realiza de manera externa es decir con algún componente que enlace al sistema con el usuario.

En S1 se manipulan las diferentes sustancias líquidas empleadas. La solución nutritiva de riego es suministrada a los canales de cultivo cada determinado tiempo (F1.1) por M1. El concentrado de solución (F1.2) y agua (F1.3) son manipulados por M2 para regula el pH y la CE que se presenta en un momento determinado, acorde al procesamiento previo de estos valores de (F3.1) (F3.2) hechos por M4.

Es necesario que, para enviar, recibir o analizar información entre cada uno de los módulos que conforman al sistema, se proporcionen las características adecuadas de la información a tratar (F4.1)

2.1.3 Concepto solución

Características

Previamente definida la arquitectura física del sistema se plantearon características relacionadas a las funciones que se buscan realizar con cada uno de los módulos. Estas características se tomaron en cuenta para proponer una solución que ayudara a satisfacer cada una de las funciones. En la Tabla 6 se muestran las funciones por módulo y las características que se consideraron para cada una de ellas.

Tabla 6 Características asociadas al sistema

Módulo	Funciones	Características
M1	F1.1 Hacer circular la solución nutritiva	C1 Ubicación del módulo
		C2 Forma del contenedor principal
M2	F1.2 Agregar un concentrado de nutrientes F1.3 Agregar agua	C3 Ubicación del módulo
		C4 Elemento de suministro de sustancia
M3	F2 Medir parámetros	C5 Ubicación de los sensores ambientales
		C6 Ubicación de los sensores relacionados con la solución nutritiva
		C7 Ubicación de los sensores de nivel

M4	F3 Controlar parámetros	C8 Ubicación del módulo
	F4 Manejar la información	
M5	F5 Comunicar el sistema	C9 Tipo de comunicación con la interfaz
M6	F5.2 Mostrar al usuario los parámetros	C10 Tipo de interfaz
S2	F6.1 Acondicionar energía	C11 Ubicación del módulo
	F6.2 Distribuir energía	
	F7.1 Proteger eléctricamente al sistema	
S4	F7.2 Proteger del agua al sistema.	C12 Forma de la carcasa
		C13 Forma del soporte del sistema hidropónico
		C14 Forma del tubo que contiene las plantaciones
		C15 Forma de los contenedores de concentrado y agua

Criteria

De manera similar se determinaron los criterios de evaluación a los que se sometieron cada una de las características previamente definidas, a fin de tener una herramienta para comparar aspectos importantes implícitos en los criterios y seleccionar uno de los conceptos de solución propuestos. Estos criterios se representan en la Tabla 7.

Tabla 7 Criterios asociados a características

No.	Características	Criterios	
C1	Ubicación del módulo	1	Facilidad de acoplamiento al contenedor
		2	Potencia requerida
C2	Forma del contenedor principal	3	Disponibilidad de espacio.
C3	Ubicación del módulo	4	Facilidad de colocación
C4	Elemento de suministro de sustancia	5	Cantidad de sustancia

C5	Ubicación de los sensores ambientales	6	Alta susceptibilidad al ambiente
C6	Ubicación de los sensores relacionados con la solución nutritiva	7	Facilidad de acoplamiento al contenedor principal
C7	Ubicación de los sensores de nivel	8	Influencia de los sensores en las propiedades de la solución
C8	Ubicación del módulo	9	Evitar calentamiento
		10	Evitar pérdida de datos por distribución
C9	Tipo de comunicación con la interfaz	11	Alcance máximo de comunicación
		12	Evitar Pérdida de información
		13	Estabilidad
C10	Tipo de interfaz	14	Portabilidad
		15	Estética
		16	Facilidad de uso
		17	Software libre
C11	Ubicación del módulo	18	Evitar calentamiento
		19	Lejanía con el agua
C12	Forma de la carcasa	20	optimización de espacio
		21	Facilidad de ensamble
C13	Forma del soporte del sistema hidropónico	22	Cantidad de lechugas
C14	Forma del tubo que contiene las plantaciones	23	Facilidad de limpieza
		24	Facilidad de unión
C15	Forma de los contenedores de concentrado y agua	25	Espacio disponible
		26	Capacidad

Generación de Concepto Solución

En la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 se muestran las características, así como las propuestas de solución que las satisfacen. Los conceptos generados tienen la finalidad ejemplificar a manera de boceto la implantación de un sistema regulador automático del pH y CE en la solución nutritiva de riego de un sistema hidropónico de lechugas.

Primera propuesta

En la Tabla 8, se muestran las soluciones respectivas a cada una de las características de diseño consideradas para la primera propuesta de solución.

Tabla 8 Primer propuesta

No.	Características	Propuesta
C1	Ubicación del módulo	Dentro de los contenedores
C2	Forma del contenedor principal	Cilíndrico
C3	Ubicación del módulo	En los tanques independientes
C4	Elemento de suministro de sustancia	Por presión
C5	Ubicación de los sensores ambientales	Sobre la carcasa del sistema de control
C6	Ubicación de los sensores relacionados con la solución nutritiva	Sumergidos en la solución nutritiva
C7	Ubicación de los sensores de nivel	Sumergidos en los contenedores (agua y concentrado de nutrientes respectivamente)
C8	Ubicación del módulo	Dentro de la carcasa del sistema de control en la zona central
C9	Tipo de comunicación con la interfaz	Ethernet/alámbrica
C10	Tipo de interfaz	Portátil/Externa
C11	Ubicación del módulo	Dentro de la carcasa del sistema de control en la zona lateral derecha
C12	Forma de la carcasa	Rectangular
C13	Forma del soporte del sistema hidropónico	En forma de cama
C14	Forma del tubo que contiene las plantaciones	Circular

C15	Forma de los contenedores de concentrado y agua	Rectangular
------------	---	-------------

De forma representativa de lo expuesto en la Tabla 8, en la Figura 19, se muestra el boceto de la primera propuesta.

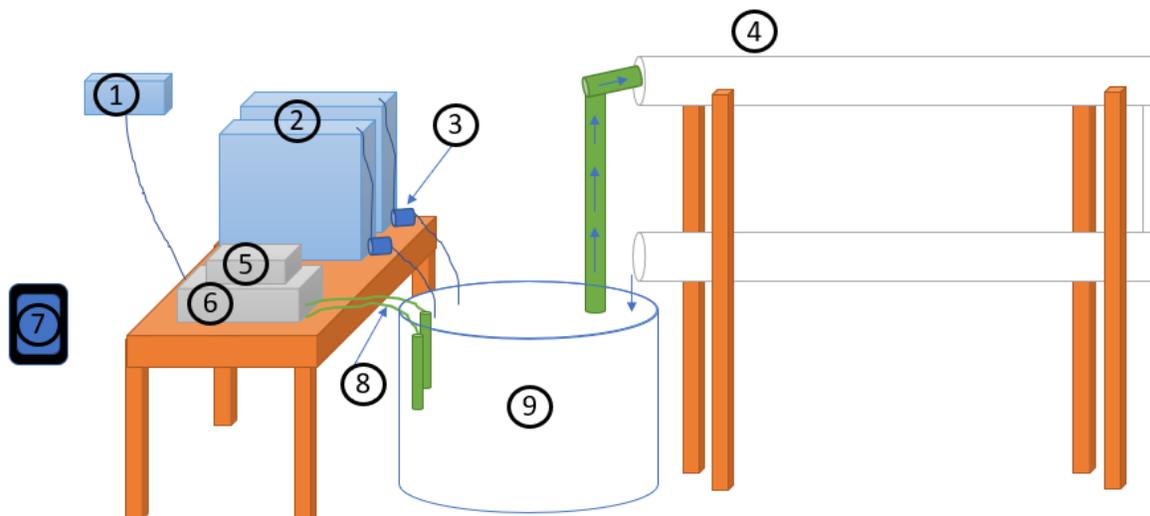


Figura 19 Boceto primera propuesta (C1)

A continuación, se indica a lo que se refiere cada número.

1. Módem.
2. Contenedores para concentrado de nutrientes y agua.
3. M1, M2, válvulas.
4. Estructura hidropónica horizontal.
5. Sensores ambientales.
6. M5, M4 y S2.
7. M6.
8. Sensores de pH y CE.
9. Contenedor principal.

Segunda propuesta

En la Tabla 9, se muestran las soluciones respectivas a cada una de las características de diseño consideradas para la segunda propuesta de solución.

Tabla 9 Segunda propuesta de concepto solución

No.	Características	Propuesta
C1	Ubicación del módulo	Dentro de los contenedores
C2	Forma del contenedor principal	Cono truncado

C3	Ubicación del módulo	En los tanques independientes
C4	Elemento de suministro de sustancia	Por gravedad
C5	Ubicación de los sensores ambientales	Sobre la carcasa del sistema de control
C6	Ubicación de los sensores relacionados con la solución nutritiva	Transportar una muestra de la solución nutritiva hacia los sensores
C7	Ubicación de los sensores de nivel	Sensores que detecten la presencia de las soluciones sin estar en contacto con ellas
C8	Ubicación del módulo	Dentro de la carcasa del sistema de control en la zona lateral izquierda
C9	Tipo de comunicación con la interfaz	Wifi/inalámbrica
C10	Tipo de interfaz	Embebida/sobre la carcasa del sistema de control
C11	Ubicación del módulo	Dentro de la carcasa del sistema de control en la zona central
C12	Forma de la carcasa	Cúbica
C13	Forma del soporte del sistema hidropónico	En forma de ZigZag
C14	Forma del tubo que contiene las plantaciones	Circular
C15	Forma de los contenedores de concentrado y agua	Cono truncado

De forma representativa de lo expuesto en la Tabla 9, en la Figura 20, se muestra el boceto de la segunda propuesta.

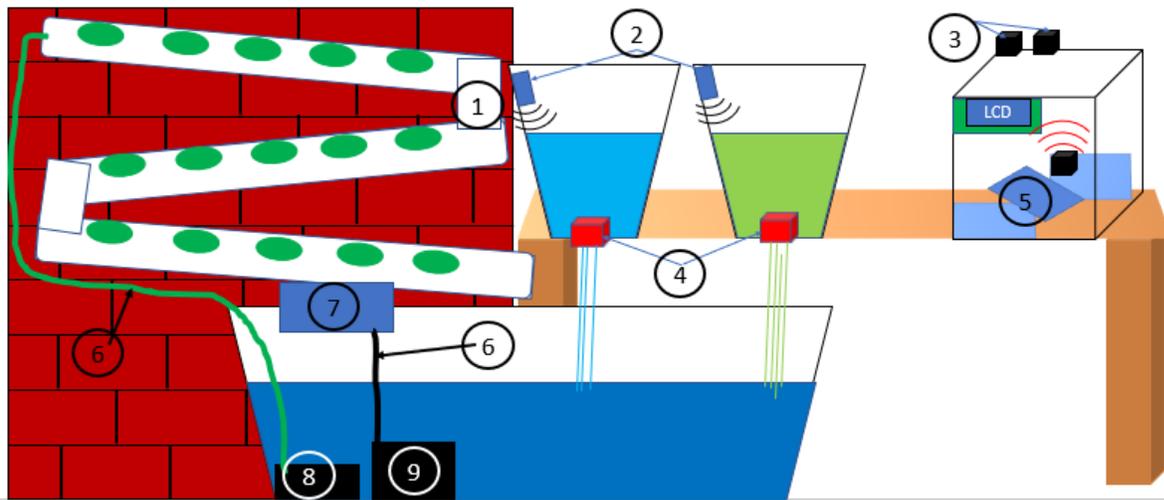


Figura 20 Boceto segunda propuesta (C2)

A continuación, se indica a lo que se refiere cada número.

1. Estructura hidropónica en zigzag.
2. Sensores para la presencia de sustancias
3. Sensores ambientales
4. Válvulas/actuadores
5. M4, S2, M2.
6. Manguera.
7. Sensores pH y CE.
8. M1.
- 9.- Bomba para subir la muestra a los sensores.

Tercer propuesta

En la Tabla 10, se muestran las soluciones respectivas a cada una de las características de diseño consideradas para la tercera propuesta de solución.

Tabla 10 Tercer propuesta de concepto solución

No.	Características	Propuesta
C1	Ubicación del módulo	Afuera de los contenedores
C2	Forma del contenedor principal	Rectangular
C3	Ubicación del módulo	Dentro del tanque de solución nutritiva

C4	Elemento de suministro de sustancia	Por presión
C5	Ubicación de los sensores ambientales	En el sistema hidropónico
C6	Ubicación de los sensores relacionados con la solución nutritiva	Mecanismo que sumerja los sensores
C7	Ubicación de los sensores de nivel	Sumergidos en los contenedores (agua y concentrado de nutrientes respectivamente)
C8	Ubicación del módulo	Dentro de la carcasa del sistema de control en la zona lateral derecha
C9	Tipo de comunicación con la interfaz	Bluetooth/inalámbrica
C10	Tipo de interfaz	Portátil/Externa
C11	Ubicación del módulo	Dentro de la carcasa del sistema de control en la zona lateral izquierda
C12	Forma de la carcasa	Cilíndrica
C13	Forma del soporte del sistema hidropónico	En forma piramidal
C14	Forma del tubo que contiene las plantaciones	Rectangular
C15	Forma de los contenedores de concentrado y agua	Rectangular

De forma representativa de lo expuesto en la Tabla 10, en la Figura 21, se muestra el boceto de la tercera propuesta.

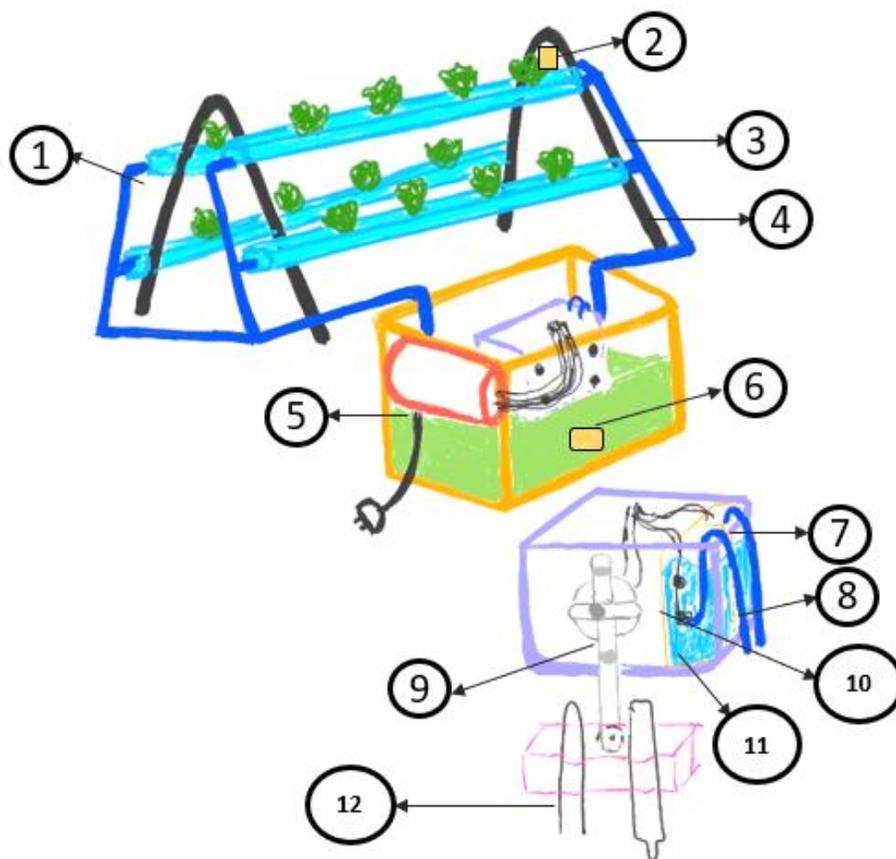


Figura 21 Boceto Tercera propuesta (C3)

A continuación, se indica a lo que se refiere cada número.

1. Tubo PVC rectangular.
2. Sensores de Temperatura y humedad.
3. Sistema NFT piramidal.
4. Tubo PVC perfil circular.
5. S2, M4, M5.
6. Actuador para solución nutritiva.
7. M1, M2.
8. Manguera.
9. Mecanismo.
10. Sensores de nivel.
11. Actuador/Bomba
12. Sensores de medición de pH y CE.

Selección de propuesta solución

Se utilizó una matriz binaria (Tabla 83, anexo A) como herramienta de selección donde se muestra una comparación directa entre criterios, obteniendo la importancia de cada

criterio a fin de posteriormente evaluar los diseños conceptuales propuestos como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Desempeño general de los conceptos

	VP	C1	P1	C2	P2	C3	P3
Cr1	0.034	10	0.337	10	0.337	10	0.337
Cr2	0.071	10	0.706	10	0.706	10	0.706
Cr3	0.034	8	0.27	7	0.236	10	0.337
Cr4	0.037	5	0.184	4	0.147	4	0.147
Cr5	0.043	8	0.344	4	0.172	6	0.258
Cr6	0.031	8	0.245	8	0.245	10	0.307
Cr7	0.052	9	0.469	6	0.313	3	0.156
Cr8	0.046	9	0.414	3	0.138	9	0.414
Cr9	0.067	8	0.54	10	0.675	7	0.472
Cr10	0.064	9	0.58	9	0.58	9	0.58
Cr11	0.049	10	0.491	7	0.344	6	0.294
Cr12	0.061	10	0.613	7	0.429	6	0.368
Cr13	0.058	10	0.583	7	0.408	6	0.35
Cr14	0.021	10	0.215	0	0	10	0.215
Cr15	0.012	10	0.123	3	0.037	10	0.123
Cr16	0.028	10	0.276	10	0.276	10	0.276
Cr17	0.025	10	0.245	10	0.245	10	0.245
Cr18	0.074	10	0.736	8	0.589	10	0.736
Cr19	0.077	10	0.767	10	0.767	7	0.537
Cr20	0.015	10	0.153	10	0.153	5	0.077
Cr21	0.003	10	0.031	10	0.031	5	0.015

Cr22	0.006	10	0.061	8	0.049	8	0.049
Cr23	0.003	10	0.031	8	0.025	6	0.018
Cr24	0.006	10	0.061	10	0.061	6	0.037
Cr25	0.046	8	0.368	10	0.46	7	0.322
Cr26	0.037	8	0.294	7	0.258	4	0.147
Total	1.000		9.138		7.681		7.525

Concepto Final

Aunque el concepto (C1) es el concepto elegido, es posible proponer una nueva configuración extrayendo las características de los otros conceptos que de manera particular los hicieron superiores en algún criterio.

Una vez identificados los criterios en los que el diseño C1 no obtuvo el mejor desempeño e identificando las características del concepto que si los obtuvo.

Cr3 Geometría del recipiente principal – Concepto mejor evaluado: C3

Contenedor principal rectangular.

Cr9 Tipo de comunicación – Concepto mejor evaluado C2

Comunicación inalámbrica mediante wifi con la interfaz

También se repensó la ubicación de los contenedores de concentrado y agua con respecto al sistema hidropónico a fin de que el sistema ocupe menos espacio.

El boceto del concepto final ya con estos cambios se muestra en la Figura 22.

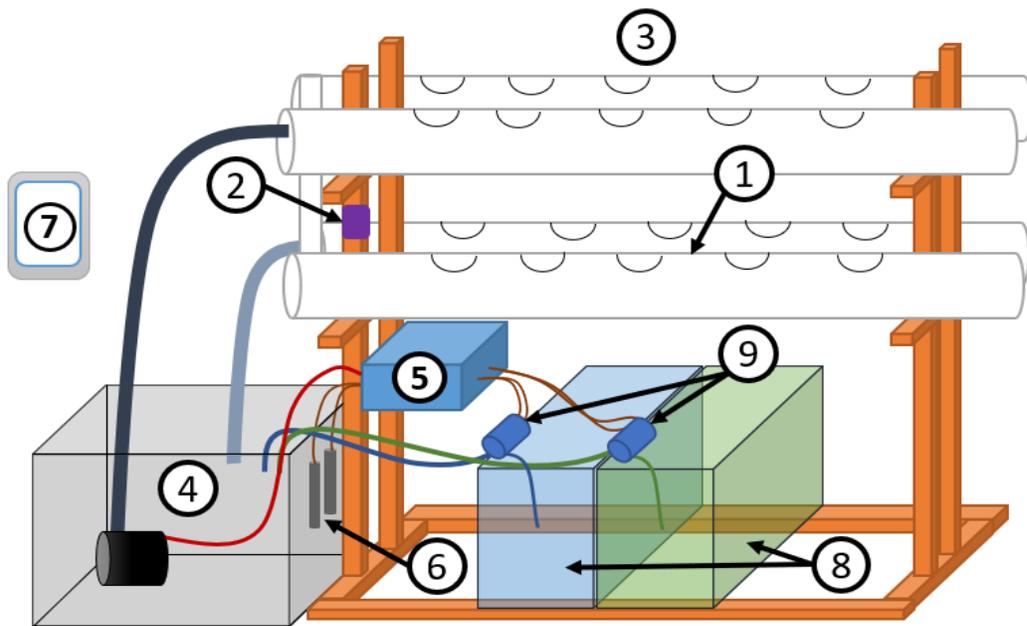


Figura 22 Boceto del concepto final mejorado

A continuación, se enlistan los componentes numerados en la Figura 22:

1. Tubo de PVC cilíndrico
2. Sensor de temperatura y humedad
3. Estructura hidropónica horizontal
4. Contenedor principal
5. Sistema de información y sistema energético.
6. Sensores de pH y CE
7. M6 Interfaz
8. Contenedores de agua y concentrado de solución
9. Bombas del Módulo 2

2.2 Diseño de dominio específico

2.2.1 (S4) Sistema estructural

2.2.1.1 Sistema hidropónico

Las variantes en un sistema hidropónico NFT pueden ser respecto a la forma y tamaño de los tubos, así como a la forma de la estructura, es decir, la orientación y acomodo de los tubos en el espacio. Estos parámetros son importantes porque influyen en la velocidad y trayectoria en la que fluye la solución nutritiva. La elección de alguno en particular también depende de las características del espacio con el que se cuente para su instalación.

En la Figura 23 se muestran las estructuras comunes para un sistema NFT.

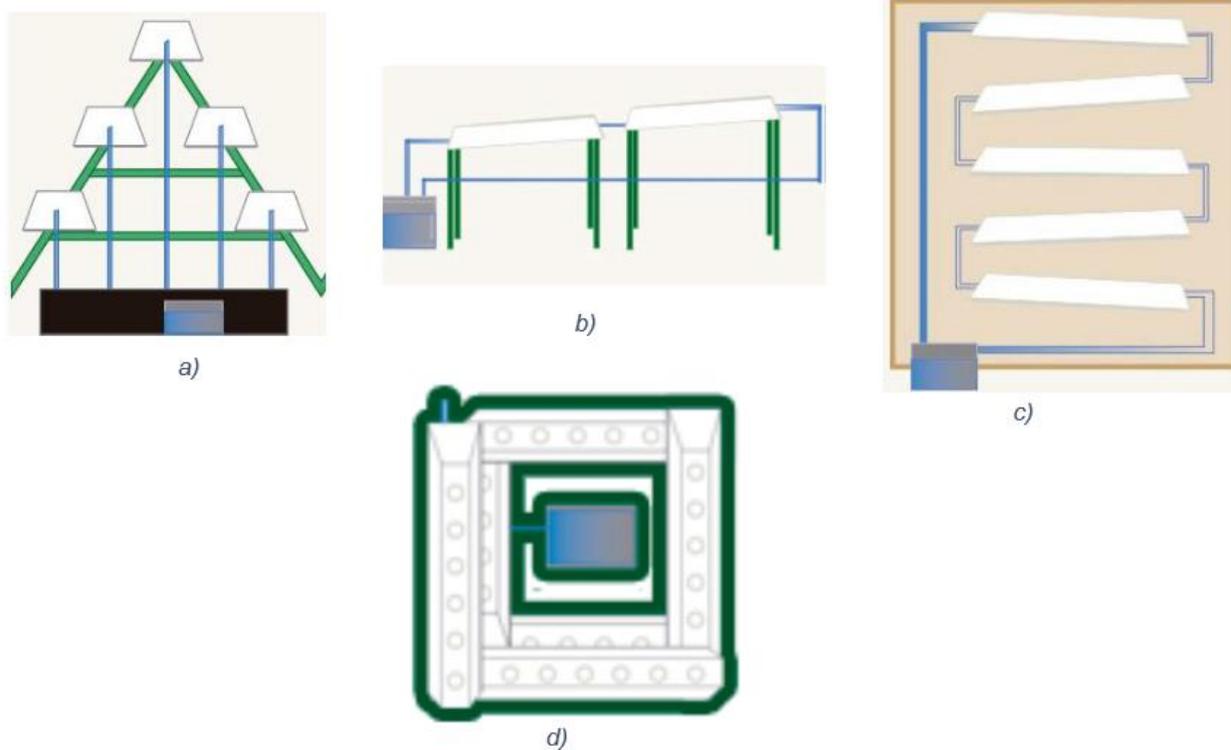


Figura 23 Tipos de estructuras para NFT; a) Estructura piramidal, b) Estructura en diseño de cama, c) Estructura en zigzag y d) Estructura en espiral

Los canales normalmente están hechos de tubería de PVC de 2 o 3 pulgadas y se sugiere que estos sean redondos debido a que los canales de fondo plano o canastillas cerradas a veces dirigen el agua a los lados del canal en lugar de directamente hacia el medio. Este desvío de agua puede dificultar el buen contacto entre las raíces de la planta y el chorro de solución nutritiva de riego. Las hortalizas normalmente son trasplantadas al sistema hidropónico en canastillas, se sugiere que estas tengan ranuras en la parte inferior para mitigar el problema previamente mencionado y distribuir la corriente de

solución de manera uniforme a lo largo del canal. De acuerdo con hydroenv en [39] y en [40] la distancia sugerida de separación para que la lechuga pueda seguir creciendo y desarrollándose de manera adecuada debe ser entre 15 cm a 25 cm.

La mayoría de los sistemas NFT comerciales tienen una longitud entre 4 a 15 pies (1.20 m a 4.50 m). El problema que pueden presentar canales más largos es la deflexión, para evitar dicha deformación, estos deben tener varios puntos de apoyo. Un canal hundido puede ocasionar que haya áreas donde el flujo de la solución de riego se quede estancado, y a su vez provocar una disminución del oxígeno disponible para las raíces, un aumento de la temperatura del agua e incrementar la posibilidad de la existencia de enfermedades en las raíces de la planta. También un canal largo puede ocasionar que la temperatura de la solución nutritiva aumente, debido a que le tomaría mayor tiempo llegar al contenedor principal. En caso de ser necesario se debe usar un enfriador de agua u otro método para enfriar la solución nutritiva. Para canales de 8 pies (2.50 m) o más cortos implementados en climas cálidos no es necesario enfriar la solución nutritiva.

La pendiente de un canal NFT también es importante para limitar la acumulación de calor en la solución nutritiva y evitar el estancamiento de la solución nutritiva dentro de los canales. Es aceptable una pendiente del 1 al 4 por ciento. [41].

La estructura para el presente trabajo se reconoce entonces como una estructura en diseño de cama. Se estableció que el espacio donde el sistema se colocará es de 1.20 m x 1.50 m.

Dado el espacio disponible donde se trabajará el prototipo, y buscando replicar las características de doble nivel del sistema hidropónico del señor Martínez se optó por buscar modelos comerciales de estructuras hidropónicas que cumplieran con lo anteriormente mencionado y tomando en consideración la teoría presentada. El modelo más cercano a dichas características fue el modelo DEUX PLUS de la empresa Veggitso [42].

La estructura se compone de dos partes, la estructura de soporte (Figura 24) y los canales que almacenan los cultivos mismo en que circula la solución nutritiva (Figura 25). Ambos diseños se realizaron en Solidworks 2020 edición para estudiantes.

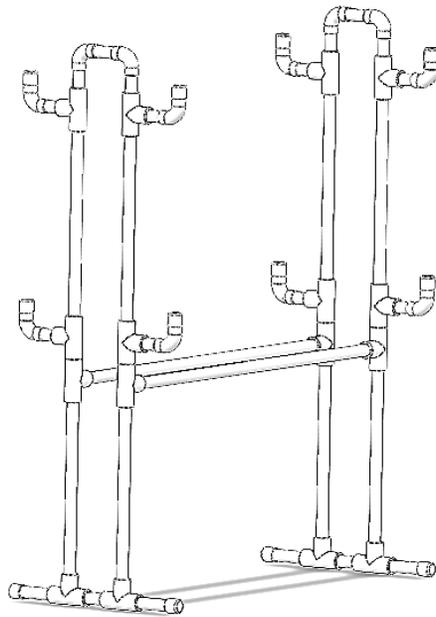


Figura 24 Estructura de soporte

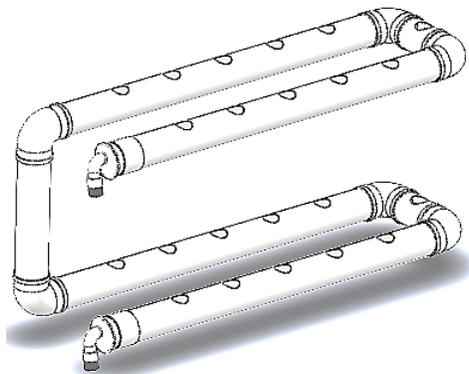


Figura 25 Estructura para canales de almacenamiento de lechugas y circulación de solución nutritiva

Los componentes de la estructura completa se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 Componentes de la estructura hidropónica.

Componentes de la estructura del sistema hidropónico.	
Pieza	Cantidad
Estructura de soporte	
Tubo PVC DE $\frac{3}{4}$ " x 40 cm	2
Tubo PVC DE $\frac{3}{4}$ " x 39 cm	2

Tubo PVC DE ¾" x 50 cm	2
Tubo PVC DE ¾" x 49 cm	2
Tubo PVC DE ¾" x 13cm	4
Tubo PVC DE ¾" x 8cm	16
Codo de 90° de PVC para tubos ¾"	14
Conector en 'T' PVC para tubos ¾"	16
Tapón PVC para tubos ¾"	12
Tubo PVC DE ¾" x 85cm	2
Estructura para los canales	
Tubo PVC DE 3" x 95cm	4
Tubo PVC DE 3" x 32cm	1
Tubo PVC DE 3" x 17cm	2
Codo de 90° de PVC para tubos 3"	6
Tapón PVC para tubos 3"	2
Conector PVC con rosca ¾"	2
Reductor de PVC de 3/4 pulgadas x 1/2 pulgadas	1

Como dato adicional se calculó la pendiente del sistema.

$$m_{\%} = \left(\frac{h}{d}\right) \times 100 = \left(\frac{1 \text{ cm}}{95 \text{ cm}}\right) \times 100 = 1.05 \% \quad (3.1)$$

Validación de materiales de la estructura hidropónica.

La estructura de soporte tiene que sostener una carga aproximada de 10 kg, en dicha carga se considera el peso de la estructura para los canales que es de 3.4 kg y el peso total de 22 lechugas que es de 6.6 kg como se muestra en la Figura 26, considerando que cada una pesa alrededor de 300gr [43] al final de su desarrollo. En la Tabla 13 se muestran de forma completa los atributos de este elemento.

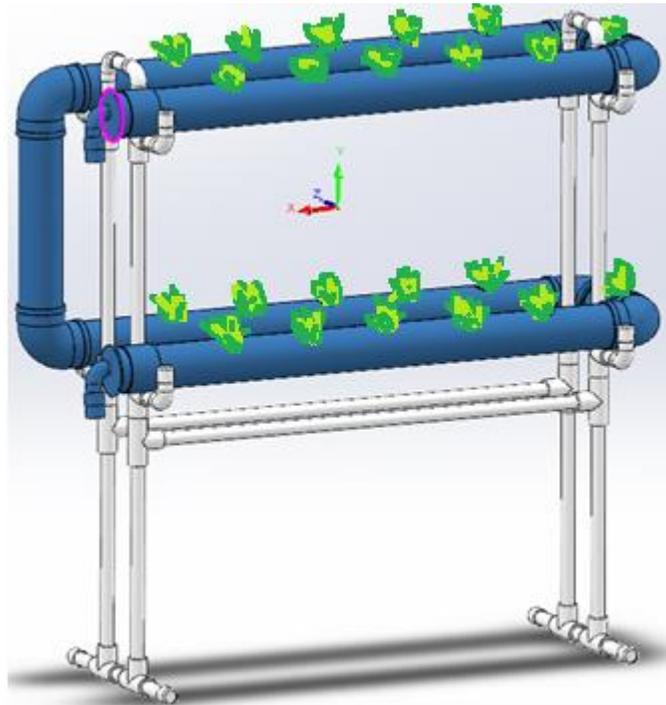


Figura 26 Carga aproximada a sostener.

Tabla 13 Atributos de la estructura hidropónica

Función	<ul style="list-style-type: none"> ➤ F7 Protección del sistema. ➤ Almacenamiento de los cultivos y recirculación de la solución nutritiva. ➤ Soporte de la estructura de recirculación de solución nutritiva y plantación.
Restricciones	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ambiente: a la intemperie ➤ No se produzca una reacción química con la solución nutritiva y agua. ➤ En los tubos de almacenamiento. ➤ Espacio hueco de 3" para la recirculación de la solución nutritiva y para la colocación de las canastillas con el cultivo. ➤ El material debe ser "ligero", o tener $\rho < 4500 \text{ kg/m}^3$ ➤ Costo $\leq 250 \text{ MXN/m}$
Objetivo	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reducir costo
Variables libres	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Material ➤ Sección transversal para los soportes laterales del sistema

De acuerdo con los atributos de la Tabla 13, se realizó el análisis de densidad (kg/m^3) contra el costo (MXN/kg), ya que se requiere una estructura “ligera” y como objetivo reducir el costo. Este análisis se muestra en la Figura 27. Para realizarlo además se utilizaron criterios como límites para reducir la búsqueda de materiales, entre estos criterios fue que el material fuera aislante (térmico y eléctrico) esto para evitar cualquier tipo de reacción química con la solución nutritiva. Esta gráfica se realizó con el Software CES Edupack 2019.

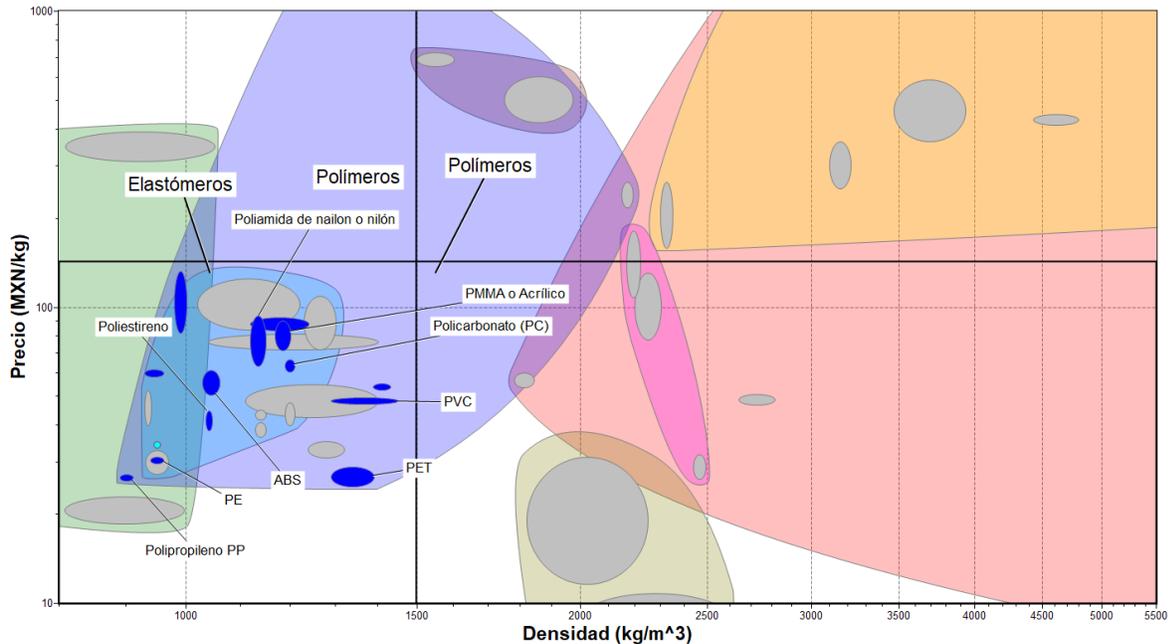


Figura 27 Diagrama precio-densidad

De la gráfica representada en la Figura 27, se puede determinar un conjunto de materiales para ser empleados en la aplicación requerida, entre los cuales se encuentran: el cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno, polipropileno, policarbonato (PC), acrílico (PMMA) y demás materiales. Todos estos materiales son de la familia de polímeros, ya que se observan dentro de la parte morada del diagrama. Los polímeros en general son materiales, resistentes, durables, resistentes al medio ambiente y tienen baja conductividad cumpliendo con los atributos propuestos en la Tabla 13. Dentro de los polímeros se encuentran los elastómeros, que es la subcategoría donde se encuentran la mayor cantidad de materiales que se podrían utilizar, aunque no todos ellos se pueden encontrar de forma común en alguna geometría útil para construir la estructura hidropónica. Los señalados en esta gráfica son elastómeros termoplásticos, esta característica es importante resaltarla ya que pueden ser suaves y flexibles cuando están por encima de su temperatura de transición o rígidos y duros cuando están por debajo de ella.

Implementación de herramienta multicriterio AHP

De los materiales obtenidos de la Figura 27, se plantearon comparar 4 materiales; ya que no todos los materiales encontrados en dicho análisis se pueden encontrar en la forma requerida para la estructura. M1 cloruro de polivinilo (PVC), M2 polipropileno, M3 policarbonato (PC) y M4 acrílico (PMMA). Se utilizaron 2 criterios: C1 elementos de ensamblaje (hace referencia a si existen componentes normalizados que se pueden utilizar para ensamblar una estructura o si por el contrario se deberían de manufacturar estos elementos de dicho material para lograr una estructura) y C2 costo.

A partir de la matriz de prioridad principal (Tabla 131, en el Anexo B) se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 14.

Tabla 14 Vector de prioridad

Cr1	0.75
Cr2	0.25

Una vez evaluadas los 4 materiales propuestos, se obtiene el desempeño de estos. La Tabla 15, se realizó a partir de las tablas AHP de cada criterio (Tabla 132, Tabla 133, en el Anexo B), esta muestra que M1 tiene el mejor desempeño.

Tabla 15 AHP del material

Solución	Ponderación
M1	0.459
M2	0.411
M3	0.051
M4	0.060

Selección de procesos

En la Tabla 16, se muestran las consideraciones para la selección de procesos de la estructura hidropónica.

Tabla 16 Consideraciones para la selección de procesos

Objetivo	Reducir tiempo
Material empleado	Cloruro de polivinilo (PVC)
Elementos de unión	Codos 90°, unión en 'T', coples, adaptadores, reductores

Forma:

Una vez revisados los procesos disponibles, el primer proceso sería de maquinado, específicamente actividades de corte de los tubos individuales y barrenado para la colocación de las canastillas.

Unión:

Para el ensamblaje de la estructura se utilizan elementos de ensamblaje para PVC como son conector en T, codo de 90°, coples, adaptadores, reductores y tapones; además de utilizar pegamento/adhesivo para PVC y cinta.

Acabado:

Dadas las características del PVC no es necesario un acabado pues la superficie es lisa y por la aplicación no requiere ningún tratamiento especial.

Validación estática

Para la validación estática del material, se decidió realizar el análisis estático en dos piezas principalmente debido a que son las piezas que presentan mayor carga, dicho análisis se hizo con ayuda del Software SolidWorks 2020.

Se analizó el tubo de PVC de 3in, tubo por donde pasará la solución nutritiva y se desarrollaran las lechugas hasta su cosecha. Se debe asegurar que este no se pandee o se rompa. El otro elemento que se analizó fueron los conectores en 'T' de la parte inferior ya que sobre estos se recarga el peso de toda la estructura hidropónica.

Tubo de PVC 3" de mayor longitud

Para este elemento se consideró una carga distribuida en la parte interna de cada barreno donde se colocarán las canastillas con las lechugas y una carga distribuida en la parte interna del tubo considerando la cantidad aproximada de solución nutritiva que estará fluyendo de manera constante mientras la bomba principal de alimentación se encuentre en funcionamiento. El tubo de PVC de 3 in con mayor longitud se puede representar como una viga doblemente empotrada debido a que este es sostenido en sus extremos por los elementos que conforman una u para colocar los tubos en la estructura de soporte. Los parámetros considerados para el análisis y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 17 y en las Figura 30, Figura 31 y Figura 32 respectivamente. Las cargas aplicadas consideran un factor de seguridad de 1.5.

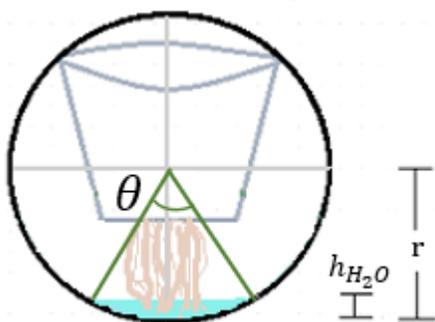


Figura 28 Perfil Tubo de PVC 3"

En la Figura 28 se muestra la altura máxima aproximada que tendría la solución nutritiva dentro del tubo de PVC de 3 in. Acorde con InfoAgro en [44] la altura de la lámina de agua en el interior del canal no debe superar los 4 ó 5 mm con el fin de conseguir una adecuada oxigenación de las raíces. Se debe recordar que en un sistema NFT no se llenan los tubos por completo, y que se tiene un flujo laminar en los canales de cultivo.

Baras en [41] sugiere que el caudal sea de 2.5 litros por canal por minuto por lo tanto se propone un volumen de 2.5 L de solución nutritiva de

riego que estará presente en el tubo. Para el análisis estático se requirió conocer los pesos de las cargas presentes en el tubo. La fórmula de la densidad (3.5), relaciona la masa contenida en determinado volumen. Conociendo la densidad específica del agua ρ_{H_2O} (3.6) y con el volumen V_{H_2O} previamente calculado se obtuvo la masa del agua (3.7)

$$\rho_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{V_{H_2O}} \quad (3.5)$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{1kg}{L} \quad (3.6)$$

$$m_{H_2O} = \rho_{H_2O} \times V_{H_2O} \quad (3.7)$$

Sustituyendo lo valores en la fórmula (3.7) se tiene que

$$\therefore m_{H_2O} = \left(\frac{1kg}{L}\right) (2.5 L) = 2.5 kg$$

En la Figura 29 se plantea el análisis del tubo de PVC de 3 in de mayor longitud (95 cm) como una viga doblemente empotrada que se realizó en el software MDSolid4.0. En ella se puede observar las magnitudes del esfuerzo cortante y el momento flector presentes en el tubo, así como la distribución de fuerzas en él. Se consideró la masa del tubo de PVC como 950 gr la cual se obtuvo con la opción de propiedades físicas del software SolidWorks 2020, la del agua como 2.5 kg, dato que fue calculado anteriormente y 300 gr [43] por lechuga (5 lechugas). Recordar que el peso esta dado por $W = m \cdot g$ donde m es la masa del cuerpo y g la gravedad.

Las fuerzas correspondientes a las lechugas son P2, P3, P4, P5 y P6. P1 corresponde al peso del tubo de PVC y P7 al peso del agua. Debido a que las fuerzas presentes en el tubo están distribuidas de manera simétrica la magnitud en las reacciones en los elementos A y B son de la misma magnitud (36.42 N) al igual que los esfuerzos cortantes positivos respecto a los negativos. El momento flector (15.31 Nm) y esfuerzo cortante máximo (27.59 N) se presentan en el punto medio del tubo donde recaen el peso del tubo de PVC, el peso de agua y el de una lechuga, estos tienen una magnitud de 27.59 N y 15.31 Nm respectivamente.

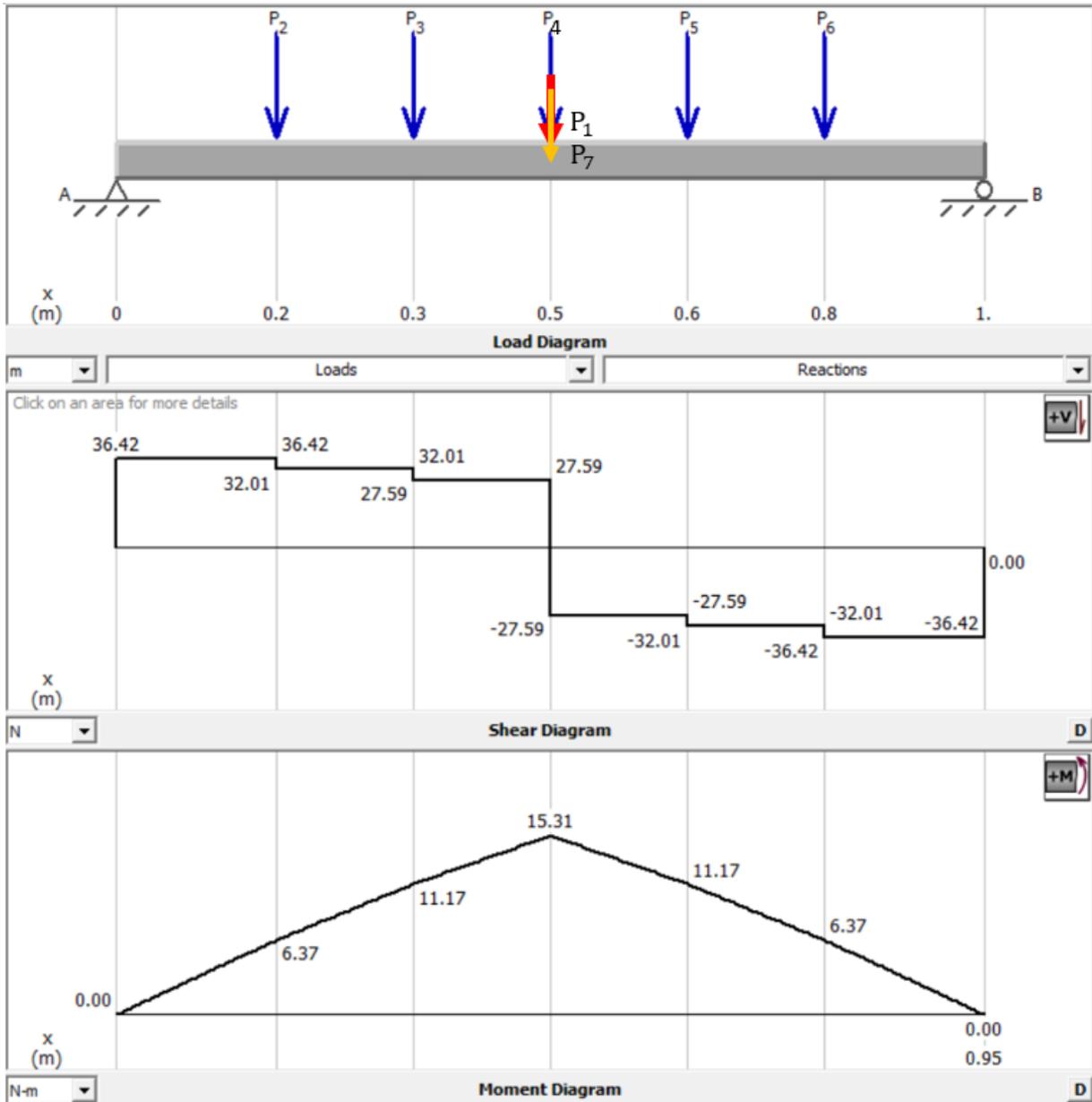
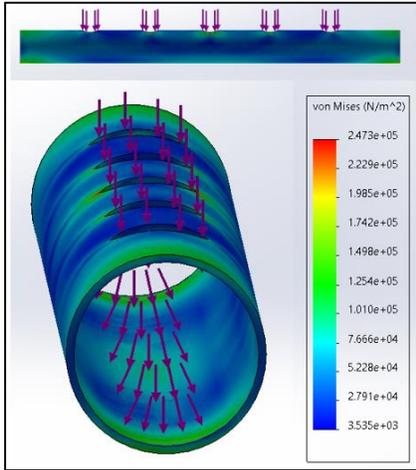


Figura 29 Pano frontal de cargas presentes en el tubo de PVC de 3" de 95 cm

Tabla 17 Análisis y resultados del tubo de 3"

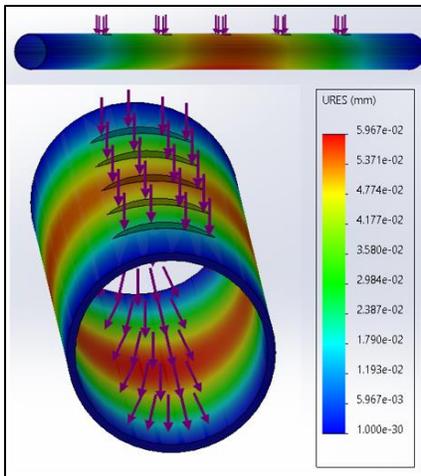
Condiciones iniciales	
Geometría fija	2 caras laterales
Cargas (1kgf = 9.81N)	F1 = 0.45 kgf F2 =3.75 kgf
Material	Cloruro de polivinilo (PVC)

Resultados	
Esfuerzo máximo de Von Mises	$2.437e+05 \left(\frac{N}{m^2}\right)$
Desplazamiento máximo	$5.967e-02 \text{ (mm)}$
deformación unitaria máxima	$7.699e-05$



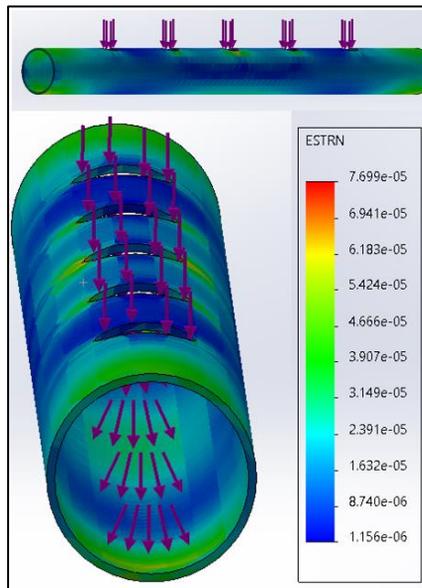
En la Figura 30 se muestra el resultado del análisis para esfuerzos de Von Mises, en esta figura se alcanza a apreciar pequeños puntos de color rojo en los laterales del barreno central lo que significa que estos puntos están sometidos a mayor compresión ($2.473e+05$) y son más propensos a presentar fracturas, sin embargo, la mayoría de los puntos en el tubo de PVC se encuentran iluminados de azul o color verde presentando un mínimo de esfuerzos de magnitud ($3.535e+03 \text{ N/m}^2$) y un máximo de ($1.742e+05 \text{ N/m}^2$) aproximadamente, por lo que no habría riesgo de falla severo.

Figura 30 Análisis de tensiones de Von Mises del tubo de PVC de 3 in



En la Figura 31 se muestra el desplazamiento que sufre el tubo de PVC de 3 in. El mayor desplazamiento ocurre en la zona central del tubo con una magnitud de $5.967e-02$ mm pues en este punto recae el peso del tubo y de una lechuga. La magnitud de los desplazamientos va disminuyendo a lo largo del tubo, de la zona central hacia los puntos de apoyo con los que es sostenido, de manera “simétrica” en los rangos de $4.774e-02$ mm a $1.000e-30$ mm

Figura 31 Análisis de desplazamiento del tubo de PVC de 3 in



En la Figura 32 se muestra la deformación unitaria que sufre el tubo PVC donde los puntos que presentan mayores deformaciones son los puntos donde el tubo es sostenido, donde se colocan las canastillas con las lechugas, así como la zona donde transcurre el flujo de la solución nutritiva con un valor entre $2.391e-05$ a $7.699e-05$. El resto de la zonas se encuentra en color azul presentando un deformación considerablemente mínima

Figura 32 Análisis de deformaciones del tubo de PVC de 3 in

Conector en 'T'

Para este elemento se consideraron dos momentos flectores originados por las fuerzas de flexión que actúan sobre los soportes donde se sostiene la estructura de los canales para cultivo. Previamente se obtuvo la magnitud de las reacciones en los soportes debido a las cargas presentes en el tubo de PVC de 3 in con mayor longitud. Para obtener la magnitud total de las fuerzas de flexión fue necesario calcular las reacciones en los soportes debido a las cargas presentes en el tubo de PVC de 3 in con menor longitud que se encuentra colocado en los laterales. El tubo de PVC de 3 in que conecta a los dos niveles no se toma en cuenta en el análisis ya que es un elemento de fuerza cero, es decir se encuentra en equilibrio debido a que la fuerza de acción que ejerce sobre el soporte del nivel dos es igual a la reacción que se genera en el nivel uno y actúan en la misma línea de acción. En la Figura 33 se muestran las fuerzas presentes en cada uno de los soportes, donde $R_{A1}, R_{B1}, R_{A2}, R_{B2}, R_{A3}, R_{B5}, R_{A4}, R_{B6}$ corresponden a las fuerzas debido al tubo de PVC de 3 in con mayor longitud y $R_{B3}, R_{B4}, R_{B7}, R_{B8}$ a las fuerzas debido al tubo de PVC de 3 in con menor longitud.

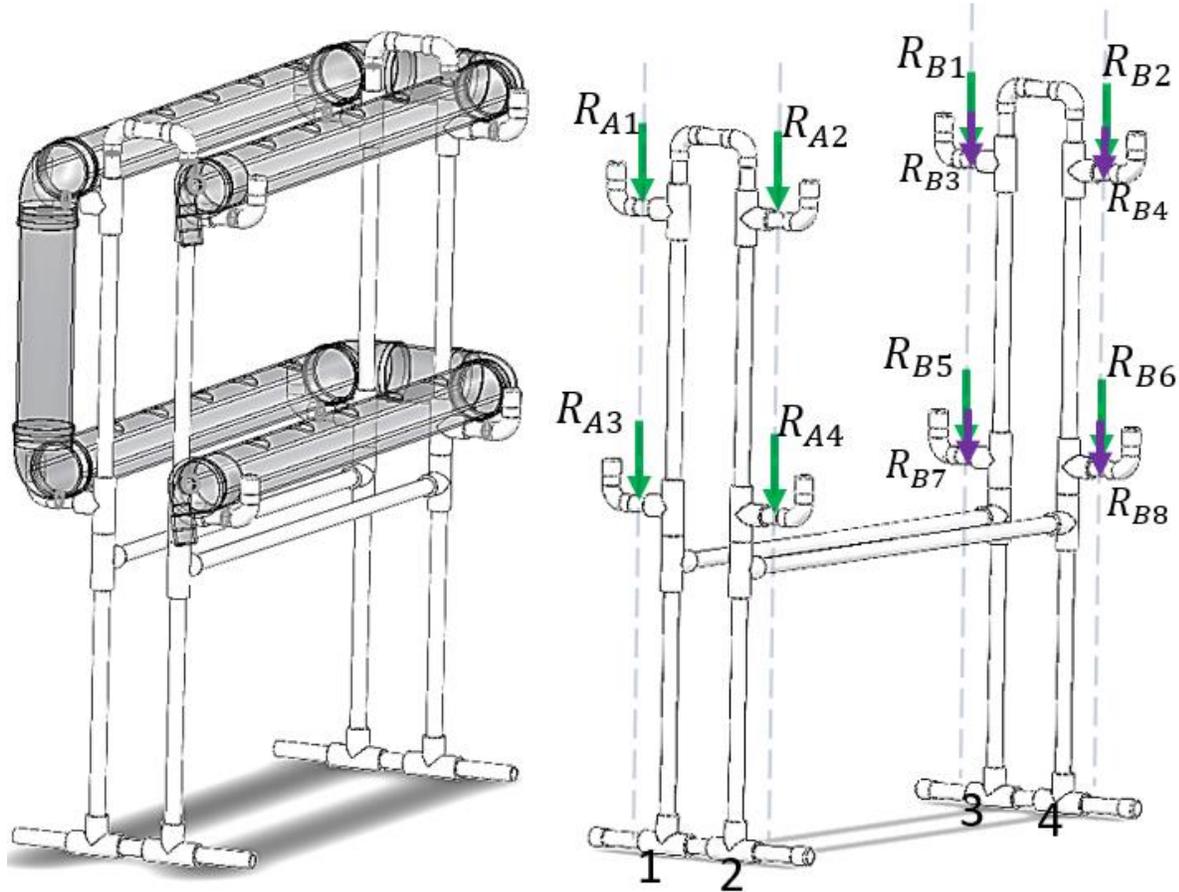


Figura 33 Fuerzas presentes en los soportes de los canales

Por tercera ley de Newton, a toda acción corresponde una reacción de igual magnitud y dirección, pero de sentido contrario, se sabe que $R_{A1}, R_{B1}, R_{A2}, R_{B2}, R_{A3}, R_{B5}, R_{A4}, R_{B6}$ es de igual magnitud a la reacción en los soportes, esta fue previamente calculada en el análisis del tubo de PVC de 3 in de mayor longitud.

$$\therefore R_{A1}, R_{B1}, R_{A2}, R_{B2}, R_{A3}, R_{B5}, R_{A4}, R_{B6} = 36.42 \text{ N o } 3.7125 \text{ Kg}$$

Se realizó el análisis estático del tubo de PVC de 3 in de menor longitud (26 cm) para obtener la magnitud de $R_{B3}, R_{B4}, R_{B7}, R_{B8}$. En la Figura 34 se plantea el análisis del tubo de PVC de 3 in de menor longitud como una viga doblemente empotrada que se realizó en el software MDSolid4.0. En ella se puede observar las magnitudes del esfuerzo cortante y el momento flector presentes en el tubo, así como la distribución de fuerzas en él. Se consideró la masa del tubo de PVC como 250 gr la cual se obtuvo con la opción de propiedades físicas del software SolidWorks 2020, la del agua como .300 kg (300ml), dato propuesto puesto que al ser de menor longitud contendrá menor cantidad de agua y 300 gr [43] por lechuga (1 lechuga). Recordar que el peso esta dado por $W = m \cdot g$ donde m es la masa del cuerpo y g la gravedad. Las cargas aplicadas consideran un factor de seguridad de 1.5.

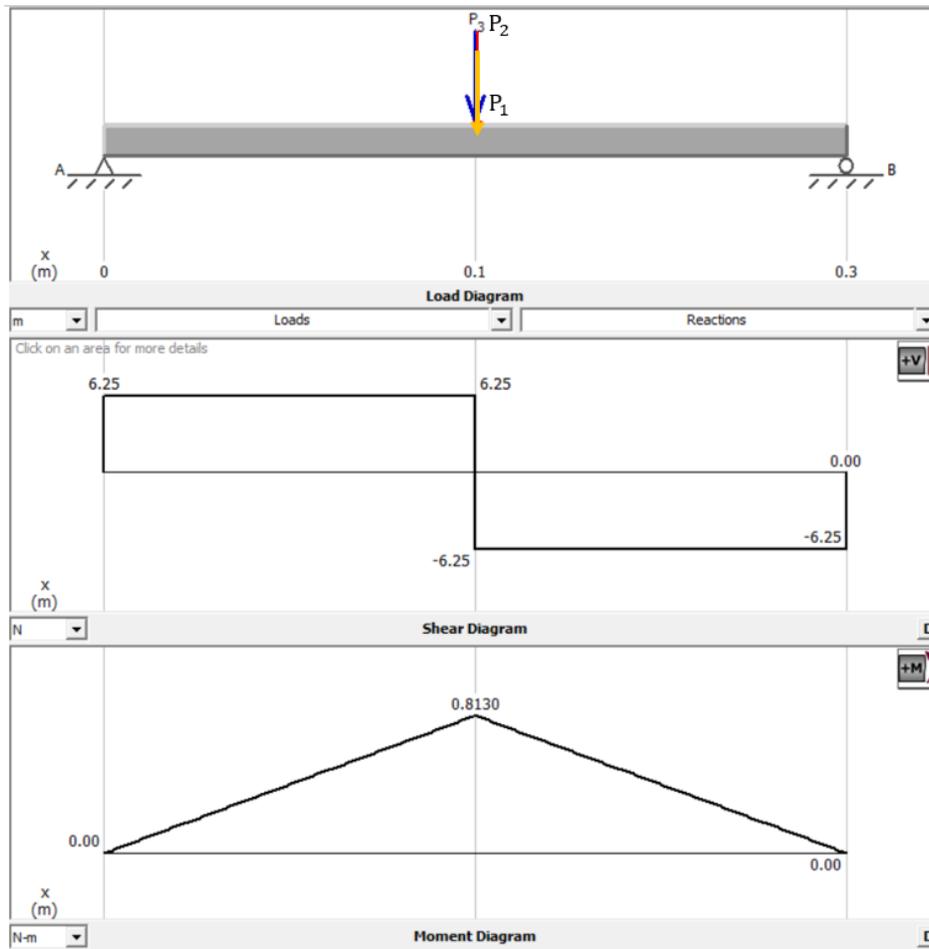


Figura 34 Plano frontal de cargas presentes en el tubo de PVC de 3" de 26 cm

La fuerza correspondiente a la lechuga es P_1 . P_2 corresponde al peso del tubo de PVC y P_3 al peso del agua. Las fuerzas presentes en el tubo actúan a la mitad por lo que las reacciones en los elementos A y B son de la misma magnitud (6.25 N) al igual que el esfuerzo cortante positivo respecto al negativo. El momento flector y esfuerzo cortante máximo se presentan en el punto medio del tubo donde recaen el peso del tubo de PVC, el peso de agua y el de una lechuga, estos tienen una magnitud de 6.25 N y 0.8130 Nm respectivamente. Por tercera ley de Newton $R_{B3}, R_{B4}, R_{B7}, R_{B8} = 6.25 \text{ N}$ o 0.6371 Kgf

Los soportes están conformados por un conector 'T', un tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ in, un codo de $\frac{3}{4}$ in y un tapón para PVC de $\frac{3}{4}$ in. Se pueden interpretar como como una viga con conexión fija. Se realizó un diagrama de cuerpo libre para identificar las reacciones en los conectores 'T' que forman parte del soporte ya que estas afectan a los tubos verticales que a su vez se unen con los conectores 'T' que conforman a la base de la estructura, lo anterior se ejemplifica en la Figura 35 donde las R_T hacen referencia a la fuerza total aplicada en los respectivos soportes, las flechas rojas a las reacciones de igual magnitud, pero sentido contrario y las M_{RT} a los momentos flexores debido a las R_T .

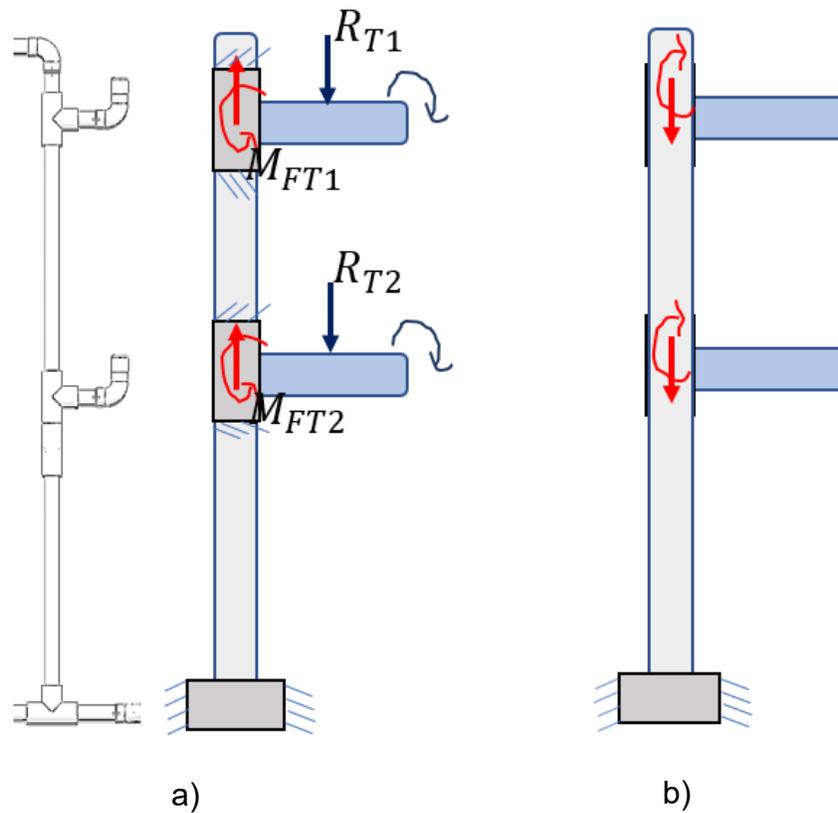


Figura 35 a) Reacciones presentes en el conector 'T' del soporte, b) Reacciones presentes en el tubo de PVC de 3/4" vertical.

Habiendo identificado las reacciones en los conectores 'T' de los soportes se analizaron las reacciones que el tubo vertical de PVC de 3/4 in experimenta, de igual forma este elemento se puede analizar como una viga con conexión fija como se muestra en la Figura 35. Por la tercera ley de Newton se sabe que la magnitud de las reacciones será igual a la de las acciones y estarán colocadas en sentido contrario. Se deduce entonces que el conector en 'T' que forma parte de la base de la estructura estará experimentando momentos flectores debido a las fuerzas aplicadas en cada uno de los soportes correspondientes. En la Figura 33 se observa que los conectores 'T' con mayor carga son el 3 y 4 que presentan las cargas $R_{B1}, R_{B2}, R_{B5}, R_{B6}, R_{B3}, R_{B4}, R_{B7}, R_{B8}$. Debido a la presencia de condiciones iguales, únicamente se analizó el conector 4. donde $R_{T1} = R_{B2} + R_{B4} = 42.67 N$ o $4.35 Kgf$ y $R_{T2} = R_{B6}, R_{B8} = 42.67 N$ o $4.35 Kgf$. En la Figura 36 se plantea el análisis individual de los soportes para los canales como una viga con conexión fija que se realizó en el software MDSolid4.0. En ella se puede observar las magnitudes del esfuerzo cortante ($42.67 N$ o $4.35 Kgf$) y el momento flector ($2.56 Nm$ o $0.26 Kgf$) presentes en el tubo de 3/4 in y por consiguiente en la conexión en 'T' de los soportes debido a R_{T1} y R_{T2} (P1).

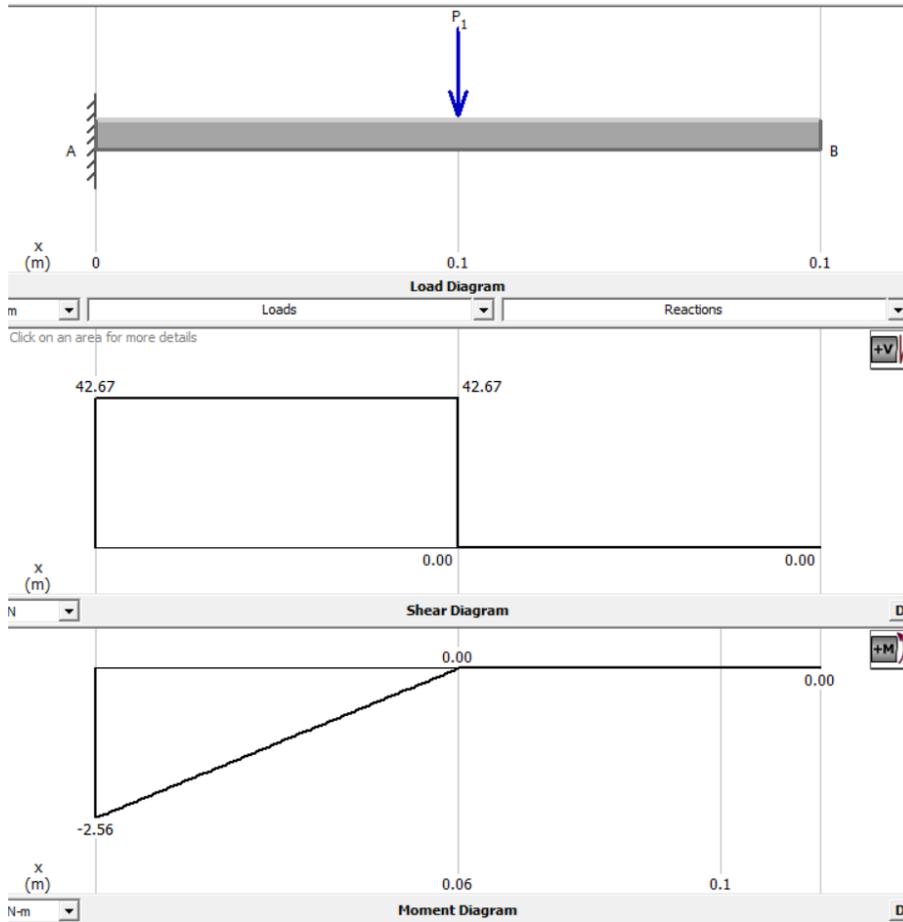


Figura 36 Plano frontal de cargas presentes en el tubo de PVC de 3/4" del soporte

Los parámetros considerados para el análisis y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 18 Análisis y resultados del conector 'T' Tabla 18 y en la Figura 38 y Figura 39 respectivamente.

Tabla 18 Análisis y resultados del conector 'T'

Condiciones iniciales	
Geometría fija	2 caras laterales
Cargas (1kgf = 9.81N)	MFT1= 2.56 Nm a 90 cm MFT2= 2.56 Nm a 40 cm
Material	Cloruro de polivinilo (PVC)
Resultados	
Esfuerzo máximo de Von Mises	$4.821e+06 \left(\frac{N}{m^2}\right)$

Desplazamiento máximo	2.384e-02 (mm)
deformación unitaria máxima	1.768e-03

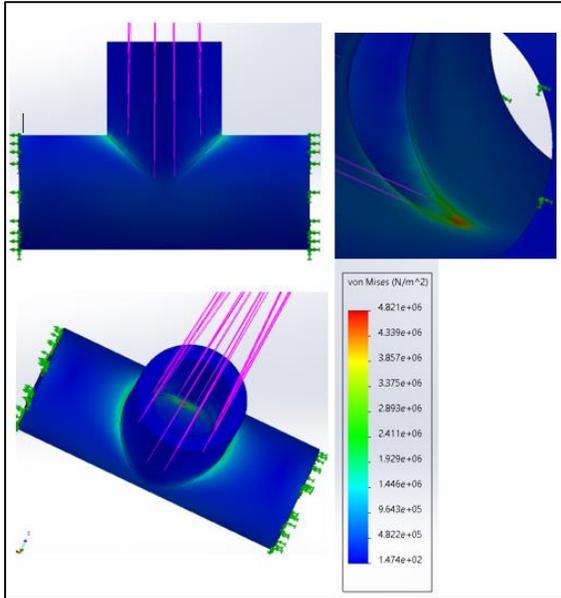


Figura 37 Análisis de tensiones de Von Mises del conector 'T'

En la Figura 37 se muestra el resultado del análisis para esfuerzos de Von Mises, en esta figura se alcanza a apreciar pequeños puntos de color rojo en la unión del cilindro vertical con el horizontal lo que significa que estos puntos están sometidos a mayores esfuerzos ($4.821e+05$) y son más propensos a presentar fracturas, sin embargo, la mayoría de los puntos en el conector 'T' se encuentran iluminados de azul presentando un mínimo de esfuerzos de magnitud ($1.474e+02 \frac{N}{m^2}$) y un máximo de ($1.446e+06 \frac{N}{m^2}$) aproximadamente por lo no habría riesgo de falla. También se puede observar que las uniones externas del cilindro vertical con el horizontal son las segundas zonas que presentan más esfuerzos

que el resto con un magnitud aproximada de ($2.411e+06$).

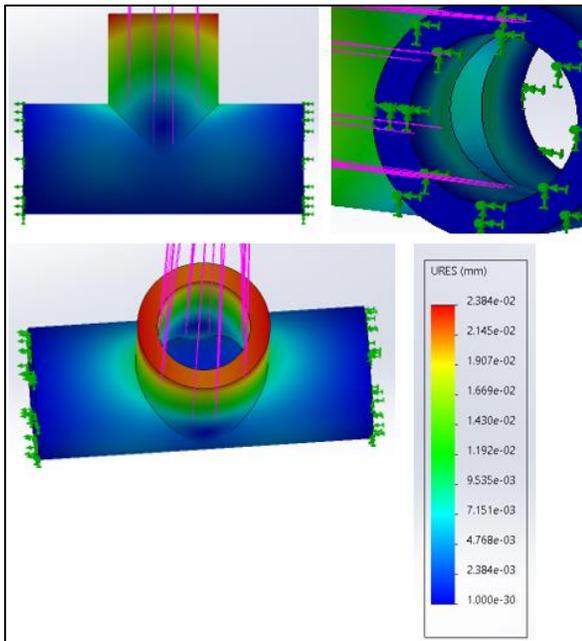


Figura 38 Análisis de desplazamiento del conector 'T'

En la Figura 38 se muestra el desplazamiento que sufre el conector 'T'. El mayor desplazamiento ocurre en el tubo vertical de este con una magnitud máxima de 2.384 e-02 mm pues en esta zona del tubo presenta un momento flector que haría que esta parte vertical del conector se doblara aparentemente debido a la fuerzas generadas por la estructura de los canales. La magnitud de los desplazamientos va disminuyendo de manera vertical hasta conectar con el tubo horizontal, en los rangos de 2.145e-02 mm a 1.000e-30 mm

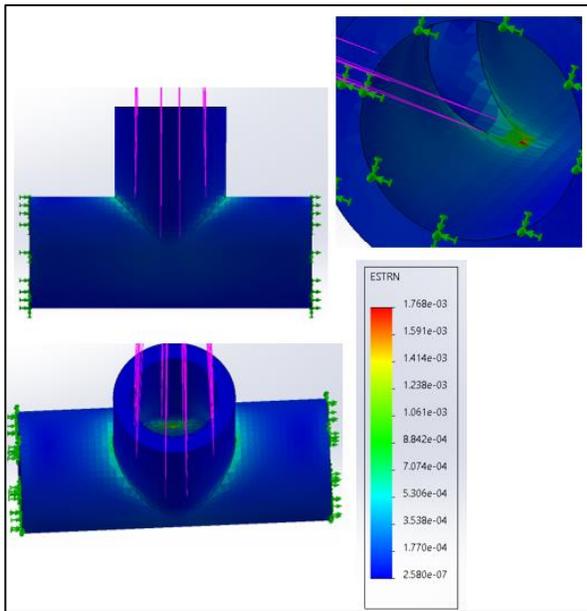


Figura 39 Análisis de deformaciones del conector 'T'

En la Figura 39 se muestra la deformación unitaria que sufre el conector 'T' donde los puntos que presentan mayores deformaciones son los puntos internos y externos de la unión del cilindro vertical con el horizontal con un valor entre $5.306e-04$ a $1.768e-03$. El resto de la zonas se encuentra en color azul presentando un deformación considerablemente mínima ($2.580e-07$)

2.2.1.2 Carcasa para los componentes electrónicos

Selección de materiales

Para la selección de materiales para la carcasa, que será la encargada de proteger del medio ambiente, a la mayoría de los componentes electrónicos se utilizó la Tabla 19, la cual enlista los atributos que debe de tener esta carcasa, su principal función es la protección de los componentes.

Tabla 19 Atributos de la carcasa para los componentes electrónicos

Función	F7 Protección del sistema.
Restricciones	Ambiente: a la intemperie El material debe ser "ligero", o tener $\rho < 4500 \text{ kg/m}^3$ Costo $\leq 250 \text{ MXN/m}$ Impermeable
Objetivo	Reducir costo
Variables libres	Material

De acuerdo con los atributos de la Tabla 19, se realizó el análisis de densidad (kg/m^3) contra el costo (MXN/kg), ya que se requiere una estructura resistente a la intemperie, "ligero" e impermeable; como objetivo se tiene el de reducir el costo. Este análisis se muestra en la Figura 40. Esta gráfica se realizó con el Software CES Edupack 2019. Al obtener los resultados de la Figura 40 se puede apreciar una gran cantidad de materiales ya que existen muchos materiales que podrían cumplir con los atributos señalados en la

Tabla 19 aunque los vidrios y cerámicas fueron descartados debido a su fragilidad y a que su manipulación y manufactura es complicada debido precisamente a esta fragilidad. También se descartaron las espumas porque en caso de algún incidente con agua, esta tiende a absorber el agua y podría llegar a causar un problema ya que los componentes estarían totalmente en contacto con esta superficie. Por lo tanto, las tablas de decisiones AHP se hicieron con materiales dentro de la clasificación de polímeros, ya que son aislantes y fáciles de manipular para conseguir la forma deseada además de poder usar algún adhesivo de silicona para sellar la base con las paredes y así evitar que el agua u otra sustancia no deseada entre y afecte los componentes electrónicos. Además, son materiales rígidos que soportan el peso y distribución de los componentes electrónicos que se requieren.

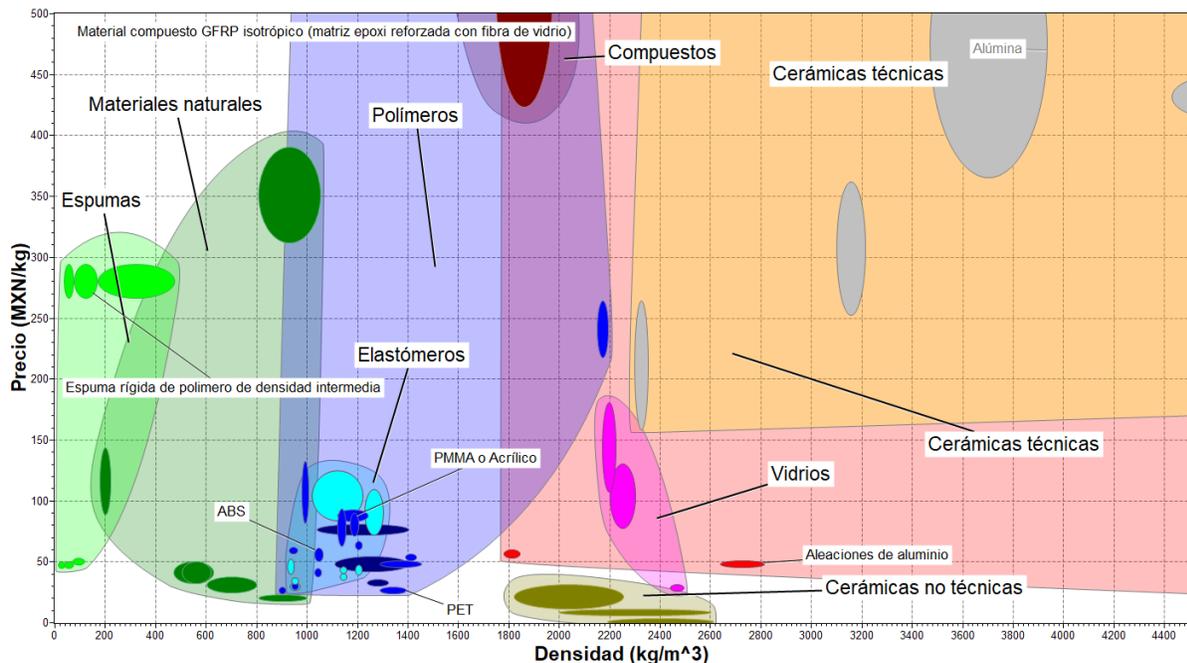


Figura 40 Gráfica precio-densidad para la selección de materiales

Implementación de herramienta multicriterio AHP

De la Figura 40, se determinaron los polímeros que pueden ser empleados para la aplicación requerida, entre los cuales se encuentran: M1 ABS, M2 acrílico (PMMA), M3 PETG y M4 aleaciones de aluminio. Estos materiales se evaluaron con criterios como Cr1 Herramientas de maquinado (hace referencia a si se cuenta con las herramientas de maquinado requerido o si el material requiere de otro tipo de herramientas para obtener la forma requerida del material), Cr2 Disponibilidad del material y Cr3 costo.

A partir de la matriz de prioridad principal (Tabla 135, en el Anexo B) se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 20.

Tabla 20 Vector de prioridad

Cr1	0.62
-----	------

Cr2	0.22
Cr3	0.16

Una vez evaluadas los 4 materiales propuestos, se obtiene el desempeño de estos. La Tabla 24, se realizó a partir de las tablas AHP de cada criterio (en el Anexo B), esta muestra que M2 tiene el mejor desempeño.

Tabla 21 AHP del material

Solución	Ponderación
M1	0.357
M2	0.383
M3	0.117
M4	0.143

Selección de procesos

En la Tabla 22, se muestran las consideraciones para la selección de procesos de la carcasa para los componentes electrónicos.

Tabla 22 Consideraciones para la selección de procesos

Objetivo	Reducir tiempo
Material empleado	Acrílico (PMMA)
Elementos de unión	El propio material con ranuras y pestañas además de adhesivos de silicón

Forma:

De acuerdo con los procesos disponibles para la forma de la cubierta, el proceso sería de maquinado, específicamente actividades de corte a los tamaños requeridos y barrenado para la colocación de los componentes electrónicos.

Unión:

Para el ensamblaje de la cubierta se utilizará pegamento para acrílico.

Acabado:

Dadas las características del acrílico no es necesario un acabado pues la superficie es lisa y por la aplicación no requiere ningún tratamiento especial.

2.2.2 (S1) Sistema de manejo de solución

2.2.2.1 Selección de contenedores

Contenedor principal

La elección de un estanque colector está determinada por el material constituyente y por su capacidad de almacenamiento de solución nutritiva para riego. El volumen del estanque está en función directa con el número de plantas, especies a cultivar y la modalidad de corrección química de la solución nutritiva la cuál puede ser a través de un sistema de corrección manual o automático. Por otra parte, es importante dimensionar la capacidad del contenedor en relación con el volumen remanente en él, para asegurar que la bomba no deje de funcionar (trabajo de la bomba en seco).

Una planta de lechuga desde su establecimiento en el sistema hidropónico con 4 a 5 hojas verdaderas absorbe aproximadamente entre 50 y 100 ml de solución nutritiva posteriormente en su máximo estado de desarrollo consume un volumen aproximado de 0.2 y 0.3 L de solución nutritiva al día. Este valor al multiplicarse por la superficie real de cultivo estima el tamaño del estanque. Se considera un 25 % más del volumen consumido como volumen remanente [45].

En la medida que se cuente con un estanque de pequeña capacidad no adecuado para la densidad de la plantación, el volumen de la solución disminuirá rápidamente por lo que las correcciones de la solución serán más frecuentes, incluso llegando a más de una corrección por día, lo que hace prácticamente al sistema inoperable en caso de usar corrección manual. Se deberá optar por volúmenes de solución al menos que dupliquen los requerimientos diarios del cultivo.

En la Tabla 23, se muestra el desglose de litros consumidos de solución nutritiva por unidad de lechuga al día y el total de litros mínimos a tener en el estanque colector para evitar el trabajo en seco de la bomba principal del sistema propuesto para el presente trabajo.

Tabla 23 Cantidad de Litros mínimos de solución nutritiva para el contenedor principal

Especie.	Volumen aproximado de solución consumida. (1 planta/día)	Densidad de plantación.	Litros en total de solución consumida considerando un 25% de volumen remanente.
Lechuga	0.3 L	22	8.25 L

En [45] se sugiere un factor de seguridad de al menos el doble de los requerimientos mínimos del sistema para la solución nutritiva consumida se obtuvo 16.5 L como la

cantidad mínima de litros que el contenedor principal deberá tener al día cuando la lechuga se encuentre en la etapa de máximo desarrollo.

De manera empírica, un productor local de lechuga hidropónica, para preparar la solución de riego utiliza una proporción de 2 L de agua por cada litro de concentrado de solución nutritiva.

En el presente trabajo se propone un contenedor principal de 60 L de solución nutritiva de riego. Para su preparación se consideran 20 L de concentrado de solución nutritiva y 40 L de agua, de modo que para su reposición y ajuste se consideran dos contenedores de 20 L y 40 L respectivamente. Los atributos para el contenedor principal pueden encontrarse en la Tabla 24, y en la Tabla 26 los atributos para los contenedores secundarios.

Tabla 24 Atributos del contenedor principal del sistema para la solución nutritiva de riego.

Función	Almacenamiento principal de la solución nutritiva
Restricciones	Ambiente: a la intemperie No se produzca una reacción química con la solución nutritiva y agua. Espacio de almacenamiento con capacidad de 50-60 L. para la solución nutritiva.
Objetivo	Reducir costo
VARIABLES LIBRES	Material Dimensiones

Para la selección del contenedor principal de acuerdo con los atributos propuestos en la Tabla 24 se buscaron diferentes tipos de contenedores con la capacidad de 60Lts, estas propuestas se encuentran en la Tabla 25. En ella, se observa que la primer propuesta es la única que cumple con el requerimiento de 60 L por ello es la propuesta seleccionada, además de ser la de menor costo y más fácil acceso al ser vendida por Home Depot, una tienda grande con envíos y diversas sucursales disponibles.

Tabla 25 Propuestas para determinar el contenedor principal

Criterio	Caja de plástico con tapa	Caja de plástico con tapa	Caja SMG15 Con tapa y broches
Capacidad	61 L	56 L	57 L
Material	Polipropileno	Polipropileno	Polipropileno
Alto	410 mm	450 mm	300 mm

Ancho	320 mm	350 mm	450 mm
Largo	600 mm	650 mm	540 mm
Costo	\$110	\$220	\$190

Contenedores secundarios

Para la selección de los contenedores secundarios se utilizó la misma tabla de atributos, Tabla 26; sin embargo, se utilizaron diferentes tablas con propuestas diversas para la selección de cada uno de los contenedores secundarios.

Tabla 26 Atributos de los contenedores secundarios (agua y solución nutritiva concentrada)

Función	Almacenamiento de las sustancias a agregar
Restricciones	Ambiente: a la intemperie Evitar una reacción química con la solución nutritiva o con el agua. Espacio de almacenamiento con capacidad de 20-40 L para el concentrado de solución nutritiva y agua respectivamente.
Objetivo	Reducir costo
VARIABLES LIBRES	Material Dimensiones

Para el contenedor de agua se consideraron diversas propuestas que cumplieran con los atributos de la Tabla 26, estas propuestas se encuentran en la Tabla 27. En ella, se observa que todas son de más de 40 L, con diferentes medidas. Las 3 cumplen con los atributos, son del mismo material así que el único criterio que se utilizó fue el precio teniendo como propuesta seleccionada la primera de 48 L ya que es más barata que las otras dos propuestas (de la segunda no se obtuvo el precio).

Tabla 27 Propuestas para seleccionar el contenedor de agua

Criterio	Caja alveo	Plastic Trends	Caja alveo
Capacidad	48 L	40 L	45 L
Material	Polipropileno de alta densidad virgen	Polipropileno de alta densidad virgen	Polipropileno de alta densidad virgen
Alto	540 mm	310 mm	590mm

Largo	390 mm	550 mm	390mm
Ancho	310 mm	410 mm	310mm
Costo	\$310	-	\$416

Para el contenedor de concentrado de nutrientes se consideraron diversas propuestas que cumplieran con los atributos de la Tabla 26, estas propuestas se encuentran en la Tabla 28. En ella, se observa que todas son de más de 20 L, con diferentes medidas y formas. Las 3 cumplen con los atributos, sin embargo, el bidon C3 por su forma resultaría más incómodo para las adecuaciones que se realizarán (adecuación de los sensores de nivel, introducir la bomba que hará fluir el concentrado de nutrientes al contenedor principal, por ello se descartó esta opción. La propuesta seleccionada fue el de 28 L porque no es necesario tanta capacidad.

Tabla 28 Propuestas para seleccionar el contenedor de concentrado de nutrientes

Criterio	Contenedores de plástico México.	Bidon C3.	Caja de plástico.
Capacidad	28L	20 L	33 L
Material	Polipropileno	Polietileno	Polipropileno
Alto	320 mm	395 mm	325 mm
Largo	420 mm	295 mm	420 mm
Ancho	320 mm	245 mm	320 mm
Capacidad de carga	28 kg	20 kg	33 kg
Costo	\$186	\$100	\$190

Los tres contenedores son de polipropileno, este material destaca por su resistencia al desgaste y contra ácidos abrasivos. Al ser un material no tan elástico como el polietileno es más difícil que se rompa y es más ligero. Además de que el polipropileno es un material usado frecuentemente en la agricultura.

Composición de la solución nutritiva

Los elementos minerales nutritivos esenciales que necesita la lechuga son aportados exclusivamente a través de la solución nutritiva que recircula en el sistema hidropónico. Las sales fertilizantes utilizadas para la preparación de una solución nutritiva se caracterizan por su alta solubilidad. Los componentes de una solución nutritiva se dividen

en dos categorías los macronutrientes y los micronutrientes. Los primeros se presentan en mayor cantidad ya que estos son los principales nutrientes que permiten el crecimiento y un buen desarrollo de la planta, los segundos son elementos que se presentan en menor cantidad como impurezas del primer grupo mencionado y son elementos indispensables que las plantas necesitan para completar su ciclo vital, estos pueden volverse tóxicos para la planta si se presentan en una mayor cantidad a la sugerida [46].

A continuación, se presenta la formulación de la solución de macronutrientes y micronutrientes para la elaboración del concentrado de solución nutritiva. Los elementos y proporciones se especifican en la Tabla 29 y Tabla 30 [47] respectivamente. Se proponen las cantidades necesarias para preparar 40L de concentrado de solución nutritiva con el fin de utilizar 20 L en la preparación de solución nutritiva de riego la cual se colocará en el contenedor principal y 20 L que se depositaran en el contenedor de reserva del concentrado de solución nutritiva.

Tabla 29 Proporciones de macronutrientes en 40 L de agua para la elaboración de concentrado de solución nutritiva.

Compuesto	Cantidad	Unidad
Ácido fosfórico	6.9	ml
Nitrato de Potasio	25.86	gr
Sulfato de Magnesio	38.0	gr
Nitrato de Calcio	49.12	gr
Micronutrientes	40.0	ml

Tabla 30 Proporciones para la elaboración de la solución madre de micronutrientes concentrada para 1000 litros de agua.

Elementos	Cantidad	Unidad
Ácido Sulfúrico	10	ml
Sulfato Ferroso	25	gr
Sulfato de Manganeso	4.06	gr
Sulfato de Cobre	3.93	gr
Sulfato de Zinc	2.20	gr
Ácido Bórico	5.75	gr

Pasos para seguir en la elaboración de la solución madre de microelementos en un litro de agua:

1. Agregar el ácido sulfúrico al litro de agua.
2. Agregar el sulfato ferroso y agitar hasta disolver.
3. Agregar el sulfato de manganeso y agitar hasta disolver.
4. Agregar el sulfato de cobre y agitar hasta disolver.
5. Agregar el sulfato de zinc y agitar hasta disolver.
6. Agregar el ácido bórico y agitar hasta disolver.

Para la preparación de concentrado solución nutritiva se requiere 1 ml de micronutrientes por cada litro de solución de macronutrientes. Para el presente trabajo se requieren 40 ml de micronutrientes.

A continuación, se muestran los pasos a seguir en la elaboración del concentrado de la solución nutritiva.

1. Acidificar el agua con el ácido fosfórico.
2. Disolver el nitrato de potasio.
3. Disolver el sulfato de magnesio.
4. Disolver el nitrato de calcio.
5. Agregar los micronutrientes.

La manutención de la solución nutritiva a utilizar no se basa únicamente en las correcciones diarias de ajuste de volumen de agua, pH y CE, también se debe encontrar limpia y en la oscuridad ya que de esta manera se reduce la proliferación de algas, la inclusión de basura o animales en ella, así como su evaporación.

2.2.2.2 Selección de actuadores

Bomba de solución nutritiva para riego.

En un sistema hidropónico NFT la solución se bombea desde un contenedor hasta el extremo superior del canal de cultivo donde empieza la distribución de la solución nutritiva al resto de los canales. Dicha solución regresa al contenedor por la velocidad que lleva debido a la bomba y más la fuerza de la gravedad ya que los canales tienen un ligera pendiente. La recirculación de la solución nutritiva en el sistema permite conservar agua y nutrientes a lo largo del desarrollo de la lechuga.

Acorde con veggitso [42] se recomienda que la bomba se mantenga encendida en lapsos de 30 min, así mismo se sugiere que el sistema de bombeo se mantenga apagado en lapsos de 1 hr 30 min o incluso 2 hrs.

En [41] se sugiere que el caudal sea de 2.5 litros por canal por minuto para así establecer una oferta adecuada de oxígeno, agua y nutrientes a las raíces de la lechuga

La estructura de canales del sistema hidropónico cuenta con 4 canales principales por los que se requiere una bomba que pueda suministrar al menos 10 L por minuto o bien 600 L por hora.

Para calcular la potencia mínima que la bomba requiere para suministrar 600 L por hora a los canales, se realizaron los siguientes cálculos.

La potencia suministrada por una bomba al fluido está dada por la ecuación (3.8)

$$P_A = h_{AT}\gamma Q \quad (3.8)$$

Ya que se desconoce la carga total de la bomba (h_{AT}) es necesario calcularla para ello se emplea la ecuación general de la energía (3.9) para los puntos 1 y 2 que forman el sistema de alimentación principal como se muestra en la Figura 41, así como para los puntos 2 y 3 los cuales conforman al sistema de canales de cultivo como se muestra en la Figura 42.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.9)$$

Para los puntos 1 y 2 se tiene que

$P_1 = 0$ Superficie del contenedor expuesta a la atmósfera.

$P_2 = 0$ Corriente libre de fluido expuesta a la atmósfera

$v_1 = 0$ Aproximadamente es nula. El área de la superficie del depósito es grande en comparación de la sección de salida.

$h_A =$ Energía añadida al fluido por la bomba

$h_L =$ Perdidas debido a la fricción (tubos, accesorios)

$z_1 = 0$ punto de referencia

$z_2 = 1.10$ m Altura del punto de succión en la bomba hasta el punto 2 en el canal hidropónico.

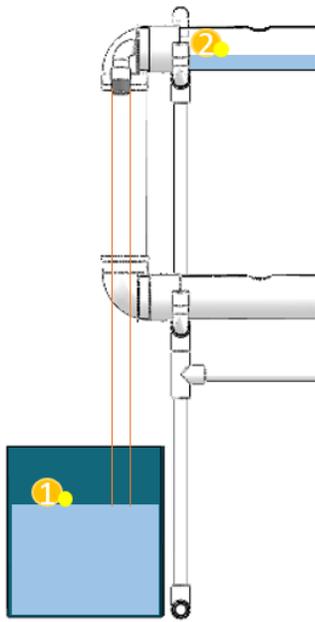


Figura 41 Sistema de alimentación principal

Considerando los criterios anteriores y despejando a h_A de (3.9) se obtiene la ecuación (3.10)

$$h_{AT1} = (Z_2 - Z_1) + h_L + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.10)$$

Para conocer la velocidad (V_2) del caudal de 600 L por hr (Q) se aplica la fórmula (3.13) donde A_2 es el área que abarca el líquido en el tubo de PVC 3 in (D). Previamente se calcula el flujo volumétrico con la conversión descrita en (3.11) y A_2 con (3.12) sabiendo que la altura aproximada del flujo en el tubo de 3 in es de 5 mm (y)

$$Q = \left(\frac{600 \text{ L}}{\text{hr}}\right) \left(\frac{\text{hr}}{3600 \text{ s}}\right) \left(\frac{1 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{\text{L}}\right) = \frac{0.1667 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{\text{s}} \quad (3.11)$$

$$\theta = \pi - 2 \text{sen}^{-1} \left[1 - \left(\frac{2y}{D}\right) \right] = \pi - 2 \text{sen}^{-1} \left[1 - \left(\frac{2(.005)}{0.072}\right) \right] = 1.066 \text{ rad}$$

$$A_2 = \frac{(\theta - \text{sen } \theta) D^2}{8} = \frac{(1.066 - \text{sen } 1.066) 0.072^2}{8} = 0.1236 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (3.12)$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{0.1667 \times 10^{-3}}{0.1236 \times 10^{-3}} = 1.3487 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.13)$$

Habiendo obtenido V_2 se procede a calcular las pérdidas presentes en el sistema de alimentación principal (h_{T1}). Primeramente, se calcula la pérdida debido a la fricción del fluido con respecto a la manguera con la ecuación de Darcy-Weisbach (3.14)

$$h_{L1} = f * \frac{L}{D_1} * \frac{V_3^2}{2g} \quad (3.14)$$

Donde

f = Factor de fricción del flujo, adimensional

L = 1.20 m Longitud de la manguera conectada desde el contenedor al sistema hidropónico, elemento naranja en la Figura 41

D_1 = 0.015 m Diámetro de la manguera conectada desde el contenedor al sistema hidropónico.

V_3 = Velocidad del fluido en la manguera conectada desde el contenedor al sistema hidropónico.

Para el valor del factor de fricción es necesario conocer el número de Reynold del fluido a transportar, debido a que se desconoce la densidad (ρ) y viscosidad dinámica (η) de la

solución nutritiva de riego se utilizan para fines de diseño los valores correspondientes al Agua a 25 °C ya que el rango de temperatura ideal de la solución va de 20 a 25 °C. Se realiza el cálculo con la fórmula descrita en (3.15). Previamente se calcula la velocidad promedio v_3 del fluido considerando la ecuación de continuidad (3.16)

$$N_R = \frac{v_3 D_1 \rho}{\eta} \quad (3.15)$$

$$Q_2 = A_2 v_2 = Q_3 = A_3 v_3 = Q \quad (3.16)$$

$$\therefore v_3 = \frac{0.1667 \times 10^{-3}}{(\pi) \left(\frac{0.015}{2}\right)^2} = 0.94332 \frac{m}{s}$$

$$N_R = \frac{v_3 D_1 \rho_{H_2O}}{\eta_{H_2O}} = \frac{(0.94332)(0.015)(997)}{8.91 \times 10^{-4}} = 15833.1656$$

Si $N_R > 4000$ el flujo es turbulento

Aplicando la fórmula de un factor de fricción para flujo turbulento (3.17) donde la rugosidad absoluta (ε) para PVC es de 1.5×10^{-6} . Se obtiene un valor de

$$f_T = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\varepsilon}\right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.17)$$

$$f_T = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{0.015}{1.5 \times 10^{-6}}\right)} + \frac{5.74}{15833.1656^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.02761$$

Sustituyendo valores en (3.14) se tiene que

$$h_{L1} = (0.02761) \left(\frac{1.20}{0.015}\right) \left(\frac{0.94332^2}{(2)(9.81)}\right) = 0.1001 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias ocasionadas por los accesorios se calculan a continuación. Para pérdidas por codos de 90° y radio largo se considera un coeficiente de resistencia de

$$K = 20f_T \quad (3.18)$$

Para pérdidas por la ampliación súbita que se presenta en la salida del codo de 90° al tubo de PVC de 3 in. se considera un coeficiente de resistencia de

$$K = [1 - (D_1 - D_2)^2]^2 \quad (3.19)$$

Empleando la fórmula de pérdidas menores (3.20) y el coeficiente de resistencia (3.18) y (3.19) correspondientes a cada pérdida se obtiene (3.22) y (3.23)

$$h_L = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (3.20)$$

Previamente se calcula la velocidad en el codo de 90° (v_c) del fluido considerando la ecuación de continuidad (3.21) y un diámetro interno del codo de 0.0276 m, esta a su vez será la velocidad previa a la ampliación a 3 in (v_A)

$$Q_3 = A_3 v_3 = Q_c = A_c v_c = Q \quad (3.21)$$

$$\therefore v_c = \frac{0.1667 \times 10^{-3}}{(\pi) \left(\frac{0.0276}{2} \right)^2} = 0.2786 \frac{m}{s}$$

$$\therefore h_{L2} = K \left(\frac{v_c^2}{2g} \right) = (20)(0.02761) \left(\frac{(0.2786)^2}{(2)(9.81)} \right) = 2.18453 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \therefore h_{L3} &= K \left(\frac{v_A^2}{2g} \right) = [1 - (0.0276 - 0.072)^2]^2 \left(\frac{(0.2786)^2}{(2)(9.81)} \right) \\ &= 3.94048 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Se obtiene el total de la carga sumando las cargas primarias y secundarias previamente calculadas.

$$h_{LT1} = h_{L1} + h_{L2} + h_{L3} = 0.1001 \text{ m} + 2.18453 \times 10^{-3} \text{ m} + 3.94048 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.1062 \text{ m}$$

Sustituyendo valores en (3.10) resulta que la carga total de la bomba para el sistema de alimentación es de

$$h_{AT1} = (1.20 - 0)m + 0.1062 \text{ m} + \frac{\left(1.3487 \frac{m}{s} \right)^2}{2(9.81 \frac{m}{s^2})} = 1.3989 \text{ m}$$

Para los puntos 2 y 3 se tiene que

$P_2 = 0$ Corriente libre de fluido expuesta a la atmósfera.

$P_3 = 0$ Corriente libre de fluido expuesta a la atmósfera

$v_2 = 1.3487 \frac{m}{s}$ Calculada previamente

$v_4 =$ Velocidad con la que llega al contenedor y a su vez con la que sale del codo de $\frac{3}{4}$ "

$h_A =$ Energía añadida al fluido por la bomba

$h_L =$ Pérdidas debido a la fricción (tubos, accesorios)

$z_2 = 0$ punto de referencia.

$z_3 = 1.10$ m Altura propuesta para asegurar que si llegue al contenedor

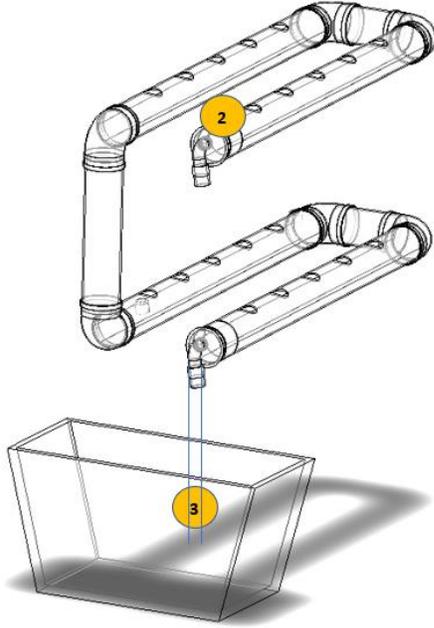


Figura 42 Sistema de canales de cultivo

Considerando los criterios anteriores y despejando a h_A de (3.9) se obtiene la ecuación (3.24)

$$h_{AT2} = (Z_3 - Z_2) + h_L - \frac{V_2^2}{2g} + \frac{V_4^2}{2g} \quad (3.24)$$

Se procede a calcular las perdidas presentes en el sistema de canales de cultivo (h_{T2}). Primeramente, se calcula la perdida debido a la fricción del fluido con respecto a los tubos de PVC de 3 in con la ecuación de Darcy-Weisbach (3.25)

$$h_{L4} = f * \frac{L}{D_1} * \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.25)$$

Para el valor del factor de fricción es necesario conocer el número de Reynold del fluido en un canal abierto, para ello se emplea (3.27) donde R es el radio hidráulico el cual se obtiene de (3.26) y ν_{H_2O} la viscosidad cinemática del agua.

$$R = \left[\frac{\theta - \text{sen } \theta}{\theta} \right] \frac{D}{4} = \left[\frac{1.066 - \text{sen}(1.066)}{1.066} \right] \left[\frac{0.072}{4} \right] = 3.22 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3.26)$$

$$N_R = \frac{v_2 R}{\nu_{H_2O}} = \frac{(1.3487)(3.22 \times 10^{-3})}{8.94 \times 10^{-7}} = 4723.0343 \quad (3.27)$$

Si $N_R > 2000$ el flujo es subcrítico turbulento

Aplicando la fórmula de un factor de fricción para flujo turbulento (3.17) donde la rugosidad absoluta (ϵ) para PVC es de 1.5×10^{-6} . Se obtiene un valor de

$$f_T = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{0.072}{1.5 \times 10^{-6}} \right)} + \frac{5.74}{4723.0343^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.03853 \quad (3.28)$$

Sustituyendo valores en (3.25) se tiene que

$$h_{L4} = (0.03853) \left(\frac{4.62}{0.072} \right) \left(\frac{1.3487^2}{(2)(9.81)} \right) = 0.2292 \text{ m}$$

Las perdidas por los codos de 90° que componen al sistema de canales se calculan empleando K (3.18) empelando (3.20) se obtiene que

$$h_{L5} = (20)(0.03853) \left(\frac{1.3487^2}{(2)(9.81)} \right) = 0.07144 \text{ m}$$

Se obtiene el total de la carga sumando las cargas primarias y secundarias previamente calculadas.

$$h_{LT2} = h_{L4} + h_{L5} = 0.2292 + 0.07144 = 0.9436 \text{ m}$$

Previamente se calcula la velocidad promedio v_4 (3.29) del fluido considerando la ecuación de continuidad. Sustituyendo valores en (3.24) resulta que la carga total de la bomba para el Sistema de canales de cultivo es de

$$v_4 = \frac{0.1667 \times 10^{-3}}{(\pi) \left(\frac{0.019}{2} \right)^2} = 0.5879 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.29)$$

$$h_{AT2} = (1.10 - 0) + 0.9436 - \frac{1.3487^2}{(2)(9.81)} + \frac{0.5879^2}{(2)(9.81)} = 1.968 \text{ m}$$

Por último, se calcula con la fórmula (3.8) la potencia mínima suministrada por la bomba al fluido para elevarlo 1.20 m y que sea capaz recorrer toda la estructura de los canales, se sustituyen los valores previamente calculados.

$$\therefore P_A = (1.3989 \text{ m} + 1.968 \text{ m}) \left(\frac{9.78 \text{ kN}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{0.1667 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{\text{s}} \right) = 5.44 \frac{\text{N m}}{\text{s}}$$

Dado que $1.0 \text{ W} = 1.0 \frac{\text{N m}}{\text{s}}$, se puede expresar el resultado en watts $P_A = 5.44 \text{ W}$

A continuación, en la Tabla 31 se muestran los atributos que la bomba principal debe cumplir.

Tabla 31 Atributos de la bomba principal de alimentación al sistema hidropónico.

Función	F1.1 Hacer circular la solución nutritiva
Restricciones	R11 Operación cada 2 horas Caudal mínimo de 600L/hr Al menos de 5.44 W
Objetivo	Reducir costo.
Variables libres	Componente

Selección de bomba

Para la selección de la bomba principal se utilizó la Tabla 31 de atributos la cual tiene como objetivo reducir costo en la selección de esta bomba. En la Tabla 32 se desglosan las propuestas de solución para la bomba principal, se encontraron 3 propuestas que cumplen con los atributos necesarios, Tabla 26.

Tabla 32 Propuestas para la bomba principal

Criterio	AQUASUB Sumergible	ECOPET Sumergible	Acuario Bomba Sumergible
Caudal máximo de agua.	600 L/H	600 L/H	600 L/H
Largo (Bomba)	6cm	5.8 cm	-
Alto (Bomba)	5cm	5 cm	-
Potencia	8 w	8 w	10 w
Altura de alcance	1.2 m	1.3 m	1.2 m
Costo	\$239	\$154	\$278

En la Tabla 32 se observa que todas son para 600 L/H, con diferentes medidas de la carcasa. Las 3 cumplen correctamente con los criterios funcionales y se tiene disponibilidad de ellas, así que el único criterio que se utilizó para la selección fue el precio teniendo como propuesta seleccionada la segunda, la de la marca ECOPET ya que es más barata que las otras dos propuestas. Esta bomba cuenta con adaptadores para manguera de 3/8 y de 1/2 según se requiera se podría optar por alguna de estas opciones para hacer fluir la solución nutritiva al sistema hidropónico.

Bomba de oxigenación

Si bien este actuador no cumple directamente con una función del sistema, un déficit de oxígeno en la solución recirculante reduce la permeabilidad de las raíces y limita la absorción de agua y nutrientes [48]. Los efectos negativos en el rendimiento de los cultivos pueden ser una coloración marrón en las raíces de las plantas, así como un crecimiento lento y una pobre absorción de nutrientes [49]. La cantidad de oxígeno disponible en el agua disminuye a causa de la temperatura, si se encuentra por arriba de los 25°C pero también si el diseño del sistema tiene pendientes reducidas en las cuales no hay una caída de agua o flujo turbulento que aumente el contenido de oxígeno disuelto al recircular [50].

El uso de una bomba de aire permite mantener oxigenada la mezcla de solución nutritiva además de contribuir a una medición confiable en los sensores de pH y conductividad al generar corrientes de agua dentro del contenedor principal que promueve la homogenización de la mezcla de solución de nutrientes razón por la cual se asocia al módulo 1, encargado del control de flujo de la solución nutritiva en el sistema hidropónico.

Selección del actuador

La absorción de oxígeno en una solución depende de la temperatura y de la composición iónica de la solución [51], sin embargo, para facilitar la elección de bombas de aire algunos fabricantes indican el volumen de sustancia que sus productos pueden manejar. En la Tabla 33 se resumen las características buscadas en el actuador.

Tabla 33 Atributos de la bomba de oxigenación

Función asociada	F1.1 Hacer circular la solución nutritiva
Restricciones	Indicada para funcionar en un volumen de sustancia de 50 L a 60 L
Objetivo	Reducir costo
Variables libres	Componente

Para la selección de una bomba de oxigenación se propusieron 3 bombas comerciales cuyas aplicaciones recomendadas por el fabricante es promover la oxigenación en acuarios y sistemas hidropónicos, además cumplieran con el objetivo de la Tabla 33.

Validación del actuador mediante AHP

Se implementó la herramienta multicriterio AHP tomando en cuenta los criterios: C1. Precio, C2. Disponibilidad y C3. Disponibilidad de especificaciones técnicas. Dicha evaluación comienza con la matriz principal Tabla 145 (Anexo B.3 S1 Sistema de manejo de solución), a partir de la cual se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 34.

Tabla 34 Vector de prioridad

Cr2	0.49
Cr1	0.31
Cr3	0.20

Las tres posibles soluciones corresponden a los modelos: S1. Ocean Aqua OC-05, S2. Aquakril 4261 y S3. TEEMO cuyas características pueden checarsse en la Tabla 151

(Anexo B.5 Características de las propuestas de solución), La ponderación de la Tabla 35 indica la selección de la propuesta S2.

Tabla 35 Resultado AHP

Solución	Ponderación
S1	0.496
S2	0.642
S3	0.334

La bomba seleccionada es la Aquakril 4261, esta bomba utiliza una manguera de silicon de 4mm de diámetro interno y 6mm de diámetro externo ya que la bomba debe de ir afuera de la solución nutritiva.

Bombas secundarias (Concentrado de solución y agua).

Mediciones previo a la selección las bombas secundarias.

Para poder proponer un caudal requerido para las bombas que harán fluir el concentrado y la solución nutritiva se obtuvo un aproximado de las proporciones de estas sustancias y su efecto en la conductividad.

Se midió la conductividad de una muestra de concentrado de solución nutritiva de 4 L (3.630 mS), se agregaron 8 L de agua con una CE de 0.490 mS, esto resultó en una mezcla de 12 L con una conductividad de 1.2 mS, ya que no está dentro del rango se le agregó aproximadamente 1 L de concentrado de solución resultando en una conductividad de 1.5 mS.

De esto se concluye que para modificar la CE en 0.1 mS, se requiere aproximadamente 1/36 del volumen total de la mezcla de solución nutritiva.

Relación de proporcionalidad

1/12 del Volumen de la Solución (L)	0.3 mS
x	0.1 mS
1/36 del Volumen de la Solución (L)	

Ya que el contenedor principal es de 60Lt para modificar la CE en 0.1mS requeriríamos 1.66 L de concentrado de solución nutritiva.

$$\left(\frac{1}{36}\right)(60 L) = 1.66 L$$

Debido a que la solución nutritiva de riego parte con condiciones adecuadas de pH y CE y el sistema estará en constante monitoreo. Se espera que los cambios en los valores de

estas variables a medir sean en el orden de las décimas. En el caso de la CE se esperan variaciones de 0.1 a 0.2 mS.

Se consideró un ciclo de trabajo de 2 horas, de las cuales la bomba principal se encuentra en funcionamiento durante 30 min y se consideraron 10 minutos de espera a fin de que el agua sobrante regrese al contenedor principal, por lo que se consideró que el sistema tiene un tiempo máximo de 1 hr con 20 min para medir y realizar el ajuste necesario, como se muestra en la Figura 43

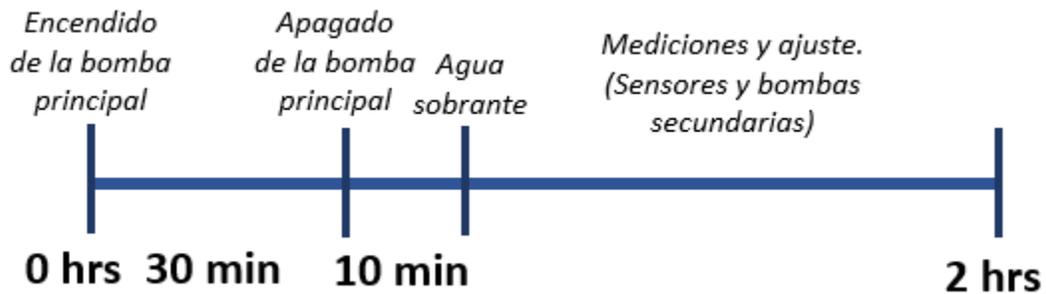


Figura 43 Diagrama del ciclo de operación del sistema

De manera que, en el caso de la CE el ajuste esperado sería de aproximadamente 0.2 mS. Para 60 L se requiere verter 3.32 L en un tiempo máximo de 60 minutos por lo tanto se requiere una bomba con un caudal mínimo de 55 ml por minuto.

Tabla 36 Atributos de las bombas secundarias.

Función	F 1.2 Agregar a la solución nutritiva un concentrado de nutrientes. F 1.3 Agregar a la solución nutritiva agua.
Restricciones	R11 Ciclos de operación, 1 ciclo cada 2 horas.
Objetivo	Tener un cambio gradual en las mediciones. Controlar un flujo determinado.
VARIABLES LIBRES	Componente.

De acuerdo con las bombas anteriormente descritas, para dosificar el agua y la solución nutritiva al sistema para regular los valores de pH y conductividad, las opciones se redujeron a las bombas de diafragma y peristálticas debido a que son las bombas que se pueden controlar el caudal por medio de la modulación por ancho de pulsos.

Esto porque se requiere ir controlando la cantidad de cada sustancia que se le va a agregar de acuerdo con las mediciones obtenidas de los sensores de pH y conductividad. Si se le agrega demasiado de alguna o de ambas sustancias, las mediciones de pH y

conductividad cambiarían bruscamente entre los valores pudiendo llegar a desestabilizar el sistema, considerando esto se optó por una bomba peristáltica.

Validación de actuadores

Se implementó la herramienta multicriterio AHP para las 3 opciones de bombas que se plantearon como solución para el concentrado de nutrientes y el agua, mismas que cumplen con los requerimientos de operación (S1 Bomba Dosificadora Profesional (Bomba Peristáltica), S2 Bomba Peristáltica De Alto Flujo Bomba Dosificadora En Minia, S3 Mini bomba de diafragma) cuyas características pueden observarse en la Tabla 153 (Anexo B.5 Características de las propuestas de solución). En esta evaluación se consideran los siguientes criterios, C1. Modulación por ancho de banda, C2. Caudal, C3. Costo y C4. Disponibilidad. Dicha evaluación comienza con la matriz principal, Tabla 140 (Anexo B.3 S1 Sistema de manejo de solución) a partir de la cual se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 37.

Tabla 37 Vector de prioridad

Cr2	0.49
Cr1	0.25
Cr4	0.17
Cr3	0.09

En la Tabla 38, se puede observar que la solución elegida es la “Bomba Dosificadora Profesional (Bomba Peristáltica)”.

Tabla 38 Resultado AHP para las bombas secundarias

Solución	Ponderación
S1	0.468
S2	0.310
S3	0.296

La opción seleccionada para usar tanto para hacer fluir el agua y el concentrado de nutrientes tiene como opción poder conectar de manguera de silicón de diversos diámetros de 3mm hasta 5mm de diámetro exterior, el más utilizado 2mm de diámetro interior por 4mm de diámetro exterior.

2.2.3 (S3) Sistema de información

2.2.3.1 Módulo de Medición

Sensor de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de una solución está relacionada con la presencia de sales, cuya disociación genera iones positivos (cationes) y negativos (aniones) capaces

de transportar la corriente eléctrica a través de ella. La unidad de medición más comúnmente utilizada en hidroponía es el miliSiemen por centímetro (mS/cm).

Una solución hidropónica típica suele prepararse con valores de CE comprendidos entre 1 y 3 mS/cm. Dado que los nutrientes hidropónicos se componen principalmente de sales minerales que se disocian en aniones y cationes en el agua, la lectura de la CE brinda una idea de la cantidad de nutrientes en la solución nutritiva, de manera que cuanto mayor sea la concentración de nutrientes (concentración de iones), mayor será el valor de CE.

Valores extremos de CE pueden afectar significativamente a la salud de la planta. Cuando la CE de la solución nutritiva es demasiado alta, puede verse afectada la absorción de agua en las raíces. Una concentración de nutrientes inferior a la deseada (valores de CE anormalmente bajos) originaría plantas con hojas amarillas y otros signos propios de un déficit de ciertos elementos, y se volverían más susceptibles a enfermedades. Si la CE de la solución llega a ser demasiado alta, basta con añadir agua para reducirla al valor original. Si por el contrario la CE llega a ser demasiado baja (70% por debajo del valor original), la composición de la solución ha sido substancialmente cambiada por la planta y necesita ser eliminada y reemplazada por una nueva.

En la Tabla 39 se muestran los valores de CE ideales para cada semana del proceso de desarrollo de la lechuga.

Tabla 39 CE ideal para el desarrollo de la Lechuga por semanas.

Semana	CE
Primera y Segunda	1.4 mS
Tercera y Cuarta	1.6 mS
Quinta y Sexta	1.7 mS

Selección del sensor de CE

Según el manual “Environmental instrumentation an Analysis Handbook” para mediciones de conductividad eléctrica que estén debajo de los 5 mS/cm puede utilizarse cualquiera de las 2 técnicas, sensor **toroidal** o de **electrodo**.

El sensor toroidal destaca por no requerir limpieza de manera frecuente mientras que los sensores de electrodo destacan por ser típicamente más pequeños y fácil de instalar que los sensores toroidales [18]

Constante de celda: Una constante de celda de 1.0 producirá una conductividad medida (G) aproximadamente igual a la conductividad específica de una solución. Sin embargo,

una constante de celda de 1.0 no siempre es una opción adecuada cuando se miden soluciones de alta o muy baja conductividad.

La Tabla 40 muestra los rangos de conductividad de soluciones típicas y sus respectivas constantes de celda óptima para cada una.

Tabla 40 Constante de celda óptima para soluciones comunes [19]

Solución	Rango de Conductividad	Constante de celda óptima
Agua ultrapura.	0.05 $\mu\text{S/cm}$	0.01
Agua de caldera.	0.05-1 $\mu\text{S/cm}$.01 o 0.1
Agua Potable.	150-800 $\mu\text{S/cm}$	1.0
Agua para torre de enfriamiento.	0-5 mS/cm	1.0
Aguas residuales.	0.9-9 mS/cm	1.0
Agua de océano.	53 ms/cm	10 (Considerando medición con sensor toroidal)
29% Ácido nítrico.	865 mS/cm	100 (Considerando medición con sensor toroidal)

En la Tabla 41 se describen los atributos que debe tener el instrumento de medición de conductividad eléctrica para ese sistema. Se puede observar que para cumplir con el requerimiento R7 la constante de celda óptima para este sistema es “k=1” de acuerdo con la Tabla 40.

Tabla 41 Atributos del sensor de conductividad

Función	F 2.1.1 Medir la conductividad en la solución
Restricciones	R7 Valor de conductividad de 1.4 mS/cm a 1.7 mS/cm
Objetivo	Requerir poco mantenimiento
Variables libres	Componente

Se propusieron 2 soluciones, Gravity: DFR0300 y Atlas Scientific: EC-K1.0, que poseen los atributos antes mencionados y cuyas características pueden observarse en la Tabla 154 (Anexo B.5 Características de las propuestas de solución)

Validación mediante la implementación de la herramienta multicriterio AHP

Se implementó la herramienta multicriterio AHP a las dos soluciones planteadas tomando en cuenta los criterios de C1. Tiempo de vida del sensor, C2. Si el fabricante incluye una solución de calibración, C3. Precisión, C4. Condiciones de operación energética

(respecto a si requiere realizar desconexiones especificas en el sistema una vez des energizado), C5. Tiempo de sumersión recomendado, C6. Tipo de señal de salida, C7. Adaptabilidad (En referencia a la cantidad de puertos disponibles para la comunicación entre el sensor y el módulo de procesamiento de datos) C8. Costo, C9. Temperatura de trabajo, C10. Disponibilidad de refacciones.

A partir de la matriz de prioridad principal (Tabla 85 Anexo B.1 S3 Sistema de información) se obtuvo el siguiente vector de prioridad, Tabla 42.

Tabla 42 Vector de prioridad

Cr9	0.215123
Cr5	0.163594
Cr3	0.157382
Cr7	0.119935
Cr4	0.097878
Cr8	0.07849
Cr6	0.062314
Cr10	0.048365
Cr2	0.02892
Cr1	0.027997

El desempeño de S1. Gravity: DFR0300 y S2. Atlas Scientific: EC-K1.0 se muestra en la Tabla 43, a partir de la cual se seleccionó el módulo de sensor Atlas Scientific: EC-K1.0.

Tabla 43 Resultado AHP sensor de CE

Solución	Ponderación
S1	0.237630812
S2	0.762369188

Selección de sensor de potencial de hidrógeno

El pH de la solución nutritiva se determina por la concentración de los ácidos y de las bases. El pH es una propiedad inherente de la composición química de la solución nutritiva y no puede cambiar independientemente. El pH de la solución nutritiva no es estático, ya que depende del CO₂ en el ambiente, de que la solución nutritiva se encuentre en un contenedor cubierto o descubierto, del ritmo de absorción nutrimental, de la fuente nitrogenada utilizada, etc. El pH de la solución nutritiva se controla con el fin de neutralizar la presencia de los bicarbonatos en el agua de riego, ya que estos iones producen un elevado pH y ocasionan que la planta presente dificultades para absorber los nutrientes de manera correcta ya que se insolubiliza.

De acuerdo con [19] el intervalo de pH adecuado para la lechuga es de 6.0 a 6.5.

En la Tabla 44 se describen los atributos buscados en un sensor de potencial de hidrógeno para ese sistema.

Tabla 44 Atributos del sensor de pH

Función	F 2.1.2 Medir el pH de la solución
Restricciones	R6 Valor del pH entre 6.0 a 6.5
Objetivo	Requerir poco mantenimiento
Variables libres	Componente

Validación mediante la implementación de la herramienta multicriterio AHP

Acorde a los atributos mencionados en la Tabla 44 se plantearon cuatro soluciones posibles, a los cuales se implementó la herramienta multicriterio AHP tomando en cuenta los criterios de C1. Tiempo de vida del sensor, C2. Si el fabricante incluye una solución de calibración, C3. Precisión, C4. Condiciones de operación energética (respecto a si requiere realizar desconexiones específicas en el sistema una vez desenergizado), C5. Tiempo de sumersión recomendado, C6. Tipo de señal de salida, C7. Adaptabilidad (En referencia a la cantidad de puertos disponibles para la comunicación entre el sensor y el módulo de procesamiento de datos) C8. Costo, C9. Temperatura de trabajo, C10. Disponibilidad de refacciones, C11. Tiempo de respuesta. A partir de la matriz de prioridad principal (Tabla 97 Anexo B. Diseño de dominio específico (Validación)B.1 S3 Sistema de información) se obtuvo el vector de prioridad, Tabla 45.

Tabla 45 Vector de prioridad

Cr5	0.2203
Cr3	0.1693
Cr4	0.1328
Cr8	0.1034
Cr7	0.0936
Cr6	0.0708
Cr10	0.0696
Cr1	0.0523
Cr11	0.0338
Cr2	0.0311
Cr9	0.0230

Las cuatro propuestas de solución son las siguientes, S1. Gravity: SEN0161, S2 Gravity: SEN0169-V2, S3. Atlas Scientific: KIT-101P y S4. Atlas Scientific: KIT-103P.Sus características pueden observarse en la Tabla 155 (Anexo B.5 Características de las

propuestas de solución). El desempeño de estas se muestra en la Tabla 46, de acuerdo con la cual se seleccionó la propuesta S4.

Tabla 46 Resultado AHP sensor de pH

Solución	Ponderación
S1	0.183867226
S2	0.223499556
S3	0.2945
S4	0.2981

Selección de sensor de temperatura y humedad

Los tipos de sensores de temperatura son los termopares, de detección de temperatura de resistencia, los termistores y los infrarrojos. Cada tecnología tiene características diferentes, pero dado que se busca una buena precisión en un rango de temperatura limitado a un bajo costo, los termistores son la tecnología que de manera general cumple con dichas características.

Para realizar el seguimiento de las variables de temperatura y humedad se requieren instrumentos de medición cuyos atributos a cumplir se muestran en la Tabla 47

Tabla 47 Atributos de los sensores de temperatura y humedad

Función	F 2.2.1 Medir la temperatura ambiente F 2.2.2 Medir la humedad del ambiente
Restricciones	R10.1 Rango de medición dentro de las condiciones climáticas de la CDMX. Temperatura: poco mayor a 25° y la más baja a 5° Clima templado subhúmedo (87%)
Objetivo	Reducir costos
Variables libres	Componente

Validación mediante la implementación de la herramienta multicriterio AHP

Según los atributos mencionados en la Tabla 47 se plantearon tres soluciones posibles, a los cuales se implementó la herramienta multicriterio AHP tomando en cuenta los criterios: C1. Rango de medición, C2. Costo y C3. Tensión de alimentación.

La evaluación se muestra a partir de la matriz de prioridad principal (Tabla 110 Anexo B.1 S3 Sistema de información) de la cual se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 48.

Tabla 48 Vector de prioridad

Cr1	0.660025
Cr2	0.262229
Cr3	0.077746

Una vez evaluadas las tres soluciones propuestas, S1. DHT11, S2. DHT22 y S3 CQRobot Ocean, cuyas características pueden observarse en la Tabla 156 (Anexo B.5 Características de las propuestas de solución). Se obtuvo el desempeño de cada una, Tabla 49. Ante dicha evaluación fue seleccionado el sensor DHT22, sin embargo, posterior a la evaluación AHP se encontró un problema de calidad en dispositivo adquirido para medir la humedad ambiental, situación que se resolvió pasando a la solución propuesta que quedó en segundo lugar en la ponderación.

Tabla 49 Resultado AHP sensor de temperatura y humedad

Solución	Ponderación
S1	0.708
S2	0.771
S3	0.502

Selección de sensor de medición de nivel

Para garantizar que el nivel de sustancia es suficiente para que el sistema funcione correctamente es necesaria una señal que indique cuando se ha llegado a el nivel mínimo para ello se requiere un instrumento de medición cuyos atributos a cumplir se muestran en la Tabla 50

Tabla 50 Atributos de los sensores de nivel

Función	F 2.1.3 Medir el nivel de cada sustancia (concentrado de nutrientes, agua y solución nutritiva)
Restricciones	R10.3 Inerte a las soluciones a utilizar
Objetivo	Reducir el costo Tomar medición de un nivel bajo específico

Variables libres	Componente
------------------	------------

Validación mediante la implementación de la herramienta multicriterio AHP

De acuerdo con los atributos mencionados en la Tabla 50 se plantearon tres soluciones posibles, a los cuales se implementó la herramienta multicriterio AHP tomando en cuenta los criterios: C1. Tensión de alimentación, C2. Disponibilidad y C3. Costo. Dicha evaluación comienza con la matriz principal (Tabla 115 Anexo B.1 S3 Sistema de información) a partir de la cual se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 51.

Tabla 51 Vector de prioridad

Cr1	0.59
Cr3	0.25
Cr2	0.16

Se seleccionaron tres posibles soluciones. S1 Ocean, no contact water level sensor, S2. Ocean contact water level sensor y S3. Sensor de nivel flotador horizontal cuyas características pueden observarse en la Tabla 157 (Anexo B.5 Características de las propuestas de solución). El desempeño de estas se muestra en la Tabla 52, a partir de cuya ponderación se eligió el sensor flotador horizontal.

Tabla 52 Resultado AHP sensor de temperatura y humedad

Solución	Ponderación
S1	0.162
S2	0.240
S3	1.364

Medición de tiempo real

Este componente se ha asociado al módulo de medición pues permite ser una referencia de tiempo para el módulo de procesamiento respecto a los procesos de control.

Selección del componente

En la Tabla 53 se resumen los atributos asociados a la búsqueda de un componente de medición de tiempo real.

Tabla 53 Atributos de componente de tiempo real

Función asociada	F2.2.3 Medir una referencia de tiempo de operación.
------------------	--

Objetivo	Ser capaz de mantener una referencia de fecha y hora aun cuando el sistema no tenga una fuente activa de energía.
VARIABLES LIBRES	Componente.

Se proponen 3 dispositivos de tipo RTC que mantienen el conteo del tiempo aun cuando la energía del sistema es interrumpida a través de una batería.

Validación del actuador mediante AHP

Se implementó la herramienta multicriterio AHP tomando en cuenta los criterios: C1. Compatibilidad de Interfaz de comunicación, C2. Disponibilidad y C3. Disponibilidad de especificaciones técnicas. Dicha evaluación comienza con la matriz principal (Tabla 119 Anexo B.1 S3 Sistema de información) a partir de la cual se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 54.

Tabla 54 Vector de prioridad

Cr1	0.33
Cr2	0.33
Cr3	0.33

Las tres posibles soluciones corresponden a los modelos: S1. DS1302, S2. DS1307 y S3. DS3231 cuyas características pueden observarse en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (Anexo B.5 Características de las propuestas de solución). El desempeño de estas se muestra en la Tabla 55, a partir de cuya ponderación se eligió la propuesta S3.

Tabla 55 Resultado AHP

Solución	Ponderación
S1	0.340
S2	0.264
S3	0.395

2.2.3.2 Módulo de Comunicación

Comunicación externa

Para realizar la comunicación externa (comunicación del sistema con el usuario) se pensó en utilizar comunicación alámbrica (con módulo ethernet) o inalámbrica (módulo Wifi o módulo GSM/GPRS). Para su selección, se realizó un árbol de decisión (Figura 44), ya que esos 3 módulos cumplen con el requerimiento de transmitir la información del sistema al usuario.

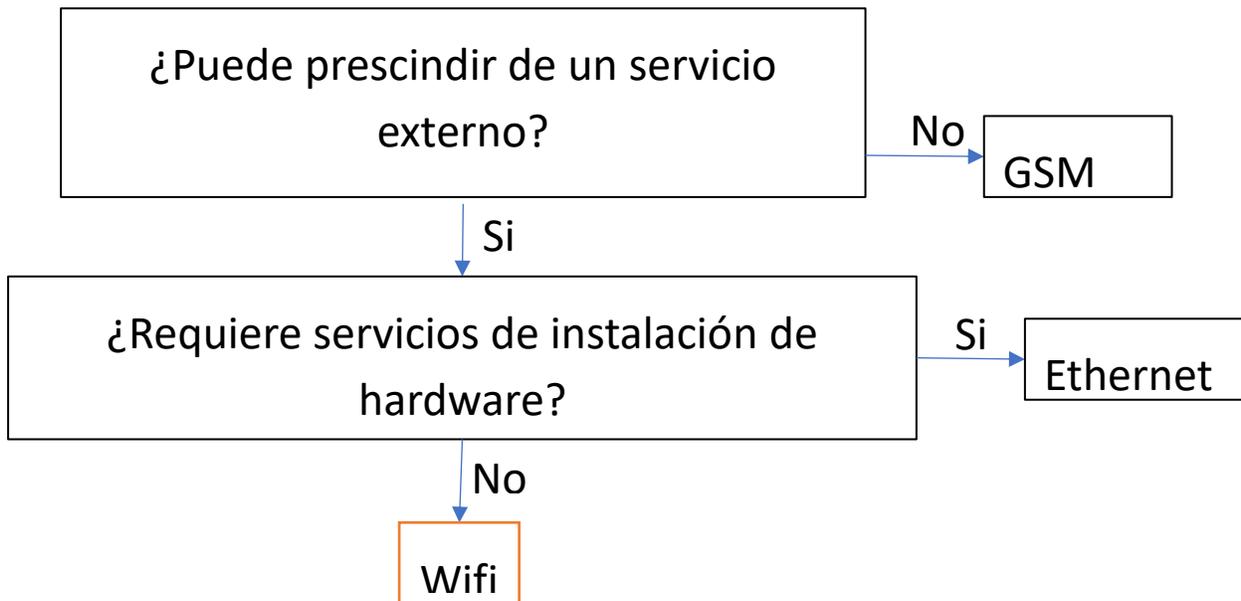


Figura 44 Árbol de decisión para determinar el módulo para la comunicación con el usuario

En la Figura 44 se aprecia que la decisión obtenida es comunicación por medio de Wifi ya que no forzosamente requiere un servicio externo como la red de telefonía en el caso de la tecnología GSM (Global System for Global Communications) el cual es el estándar predeterminado para las comunicaciones móviles. A pesar de que si es posible tener un servicio externo (enrutador inalámbrico que esté conectado a la red de internet) también es posible realizar un red de área local (LAN) por lo cual no es indispensable contar con dicho servicio externo, simplemente la comunicación se realizaría de forma local. Agregando que no se requieren servicios de instalación de hardware, la comunicación por medio de Ethernet requiere de cables (comunicación alámbrica) lo cual ocasionaría instalar canaletas para cables y también podría ser necesario realizar perforaciones en el lugar para poder pasar los cables a través de las paredes desde el lugar del enrutador hasta donde está el sistema. Estas razones fueron las que se utilizaron para seleccionar la comunicación por medio de Wi-fi, la cual es una tecnología basada en los estándares IEEE 802.11 que utiliza radio frecuencia (RF) para extender las redes de área local (LAN) a dispositivos habilitados para Wi-Fi, lo que permite a los dispositivos recibir y enviar información desde Internet [52].

Con esta tecnología, se pretende que el usuario pueda entrar a la interfaz para revisar datos del sistema y en caso de ser necesario, puede ver si los contenedores tienen suficiente agua y/o concentrado de nutrientes para que el sistema siga manteniendo la solución nutritiva en los rangos de pH y conductividad requeridos. Wi-Fi utiliza el Protocolo de Internet (IP) para comunicarse entre los dispositivos de punto final (end points) y la red LAN.

Comunicación interna

El módulo de comunicación interna hace referencia a la manera en que los periféricos dentro del sistema estructural van a interactuar con el dispositivo de procesamiento, a fin de que el dispositivo de procesamiento y los periféricos puedan comunicarse y de ser necesario considerar circuitos de acoplamiento.

En la Tabla 56. se muestran las características eléctricas, los requerimientos de comunicación interna y externa.

Tabla 56 Módulo de comunicación

Periféricos	Modos de comunicación / Energía de encendido		Requerimientos de comunicación
Módulo de medición			
Sensor CE	UART	I2C	Puerto Serial
Sensor pH	Tensión analógica 0 - 3 V		Terminal analógica
Sensor de temperatura y humedad	Señal digital		Terminal digital
Sensor de nivel (concentrado)	Interruptor		Terminal digital
Sensor de nivel (agua)	Interruptor		Terminal digital
Sensor de nivel (c. principal)	Interruptor		Terminal digital
Módulo de flujo de solución			
Bomba principal	AC / 120 V		Terminal digital

Módulo Concentración			
Bomba peristáltica (Concentrado)	PWM / 12 V		Terminal PWM
Bomba peristáltica (Agua)	PWM / 12 V		Terminal PWM
Módulo Interfaz			
Enviar datos a la interfaz	UART		Puerto serial
Reloj externo	I2C	SPI	I2C ó 3 terminales digitales

2.2.3.3 Módulo de Procesamiento

Especificar el dispositivo de procesamiento.

Este dispositivo es el encargado de recibir la información del módulo de medición y acondicionarla de modo que el algoritmo de control sea capaz de tomar decisiones sobre el comportamiento de los actuadores y la información presentada en la interfaz, cuyos atributos se describen brevemente en la Tabla 57.

Tabla 57 Atributos del dispositivo de procesamiento

	<p>F4 Manejar información</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ F4.1 Acondicionar información ○ F4.2 Procesar información ○ F4.3 Almacenar información
Funciones relacionadas	<p>F3 Controlar parámetros</p> <p>F5 Comunicar el sistema</p>
Objetivo	<p>Optimizar recursos</p> <p>Compatibilidad con los periféricos</p>
Variables libres	Dispositivo

Restricciones en entradas y salidas analizadas en el módulo de comunicación

De la Tabla 56 se pueden establecer las siguientes restricciones: es necesario que el dispositivo de procesamiento cuente con al menos un puerto serie, un puerto I2C, un puerto SPI o un segundo puerto I2C, dos terminales capaces de producir modulación por ancho de pulsos (PWM) y sea capaz de manejar al menos una terminal de entrada analógica y cinco terminales digitales para gestionar la comunicación interna del sistema.

Validación mediante la implementación de la herramienta multicriterio AHP

Acorde a las funciones mencionadas en la Tabla 57 y las restricciones establecidas por el módulo de comunicación, Tabla 56, se plantearon cinco soluciones posibles, a las cuales se implementó la herramienta multicriterio AHP tomando en cuenta los criterios de C1. Disponibilidad de componentes, C2. Costo C3. Escalabilidad en terminales (Es decir, si es posible conectar periféricos adicionales), C4. De distribución nacional y C5. Frecuencia de reloj.

Mediante una matriz de prioridad principal (Tabla 125, Anexo B.1 S3 Sistema de información) se obtuvo el siguiente vector de prioridad, Tabla 58.

Tabla 58 Vector de prioridad

Cr4	0.30
Cr5	0.26
Cr2	0.22
Cr1	0.18
Cr3	0.07

Se propusieron cinco tarjetas de desarrollo, M1. Arduino UNO R3, M2. Arduino nano V3, M3. Wemos D1 R32 ESP32, M4. Wemos D1 WiFi ESP8266 y M5. Tiva C 123G cuyas características pueden observarse en la Tabla 159 (Anexo B.5 Características de las propuestas de solución). Dichas soluciones son capaces de cumplir con la función requerida y cumplen con los requerimientos mínimos de puertos de comunicación, sin embargo, su entorno de programación y otros parámetros técnicos como la frecuencia de reloj y tensión de operación difieren, al ser modelos de 3 fabricantes diferentes. El desempeño de estas frente a los criterios de validación se muestra en la Tabla 59, de acuerdo con la cual se seleccionó la propuesta M3.

Tabla 59 Resultado AHP dispositivo de procesamiento

Solución	Ponderación
M1	0.273
M2	0.246
M3	0.300
M4	0.229
M5	0.140

La opción M3 fue la que mayor puntaje obtuvo, debido a problemas de conexión y compatibilidad con 2 de los 3 computadores que se tienen para el desarrollo del proyecto, se eligió una tarjeta de desarrollo de la compañía Arduino no siendo ninguna de las propuestas arriba debido a que no se sabía cuanta memoria iba a ocupar el algoritmo de control. En el Capítulo 3. Implementación del sistema en el apartado

en la verificación del módulo de procesamiento prueba 1 se describen los errores al implementar la tarjeta Wemos D1 WiFi ESP8266.

La tarjeta de desarrollo que se utilizará es Arduino Mega, cuyas principales especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 60. Esta tarjeta de desarrollo cumple con todas las funciones descritas en la Tabla 57.

Tabla 60 Especificaciones técnicas Wemos D1 R32 ESP32

Microcontrolador (MCU)	ATmega2560 Arquitectura RISC
Tensión de operación	5 V
Memora Flash	256KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Entradas analógicas	16 (10 bits)
Entradas/Salidas digitales	54 (14 con funciones PWM de 8bits)
Puertos seriales	4 puertos seriales
Alimentación de la tarjeta	7V - 12V
Consumo de corriente	Modo ahorro: : 0.1 μ A Modo activo: 500 μ A
Dimensiones	68x53 mm
Peso	0.1 kg

Diseño del algoritmo de procesamiento o controlador

Se plantea un sistema de control difuso, es decir, un sistema de inferencia difuso (FIS) tipo Mamdani con funciones membresía discretas para la activación de las bombas de agua y concentrado de nutrientes de acuerdo con los valores de los sensores de pH y de CE. A fin de mantener a la solución nutritiva dentro de los rangos requeridos para las lechugas.

Se utilizaron como variables de entrada las mediciones del sensor de pH y de CE. Para el sensor de pH, se propusieron cinco funciones de membresía en un universo de 0 a 4095, se puede observar en la Figura 45, esto porque el sensor de pH ofrece una señal analógica de 0 a 3V aproximadamente, entonces cambiando el voltaje de referencia del microprocesador a 3V, cambiaría la resolución a $3/4095=0.7326\text{mV}$ lo que nos brindaría mayor precisión en la lectura para conocer el pH. Dentro de la Figura 45, en la parte lateral derecha aparecen los nombres de estas funciones de membresía, los cuales tienen el siguiente significado:

- MB 14 a 11: Muy básica, esto es a consideración de que una sustancia es básica a partir de 8 hasta 14 por lo que se decidió dividir este conjunto en sustancias muy básicas de 11 a 14.
- B 10 a 7: Básica, aunque el 7 se consideraría que la sustancia sería neutra, en algunos casos se considera neutro del 6 al 8; en el caso de este trabajo el pH deseado es de 6 a 6.5 por ello se descartó el nivel de neutro para excluir los valores mayores a estos clasificándolos como básicos.
- Lechuga 6.5 a 6: El nombre indica que esos son los valores de pH deseados para la lechuga.
- A 6 a 3: Se refiere a que una sustancia es ácida si tienen esos valores. Se incluyó al 6 por los valores cercanos a él.
- MA 3 a 0: Hace referencia a sustancias muy ácidas.

Para el sensor de conductividad se propuso la función de membresía en un universo de -3000 a 3000, se puede observar en la Figura 46 esto porque se va a utilizar el error de medición con respecto a un valor seleccionado de conductividad (1400 $\mu\text{S/cm}$ para la primer y segunda semana, 1600 $\mu\text{S/cm}$ para la 3era y 4ta semana y 1700 $\mu\text{S/cm}$ para la 5ta y 6ta semana). Se eligió ese tamaño de universo debido a se espera que la solución nutritiva jamás rebase los 3000 $\mu\text{S/cm}$ y dado que se va a utilizar el error, el mínimo error que se podría utilizar en ese universo es de -3000 (que sería que la referencia fuera 0 y la conductividad fuera 3000) y como máximo 3000 en dado caso que la referencia fuera 3000 y la conductividad de la solución nutritiva fuera 0; ambos casos son improbables, pero se consideraron. Dentro de la Figura 46, de lado derecho se observan los nombres de cada una de las funciones de membresía, estos nombres tienen el siguiente significado:

- EGC: Error grande conductivo, quiere decir que la sustancia es mucho más conductiva de lo que se desea para las lechugas.
- EMC: Error medianamente conductivos, hace referencia a que la sustancia es un poco más conductiva de lo que se requiere.
- CE Lechuga: a sustancia está en los rangos de CE para la lechuga.
- EMPC: Error medianamente poco conductivo, se refiere a que la sustancia tiene menor conductividad a la que se requiere.
- EGPC: Error grande poco conductivo, cuando la sustancias tienen muy poca conductividad acorde con los valores que se requieren.

Como variables de salida se propone el control de la bomba de agua (Figura 47) y la bomba de concentrado de nutrientes (Figura 48), estas bombas al ser peristálticas se puede controlar su caudal mediante una señal PWM. El microcontrolador elegido, tiene salidas PWM de 16 bit, por lo que dichas variables de salidas tienen un universo de 0 a 65535. Dentro de estas figuras, Figura 47 y Figura 48 se tienen los nombres de cada función membresía, los cuales significan lo siguiente:

- Nada fluido: Significa que la bomba va a estar apagada para que no fluya alguna sustancia.
- Poco fluido: Significa que la bomba apenas se encendió con un caudal bajo.
- Fluido: Significa que la bomba permite un mayor caudal que en la anterior.
- Mas fluido: Se refiere a que existe un mayor caudal, pero sin llegar al máximo caudal de la bomba.
- Mucho fluido: Significa que la bomba está al máximo de su caudal.

La simulación del control difuso se realizó en el software LabView versión 20.0 de 32bits y la herramienta “Fuzzy system designer” el cual es un complemento de dicho software, la definición de las funciones membresía para las entradas y salidas se presentan en las siguientes figuras (Figura 45, Figura 46, Figura 47 y Figura 48).

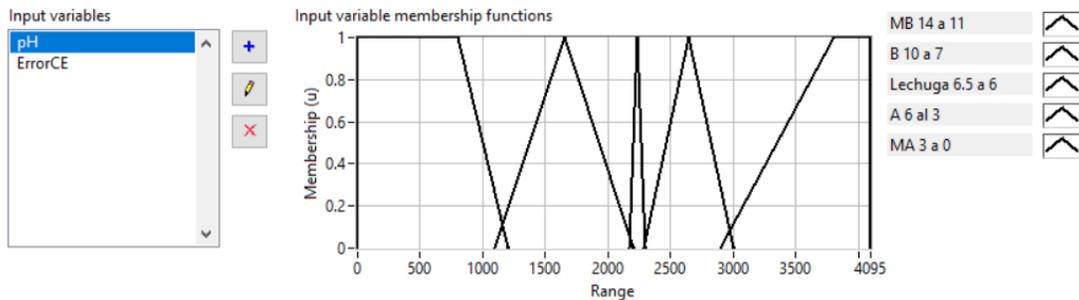


Figura 45 Funciones membresía del sensor de pH

La Figura 45 presenta las funciones de membresía utilizadas para la variable de entrada de la lectura del sensor de pH. Para definir los rangos de cada función de membresía se utilizaron los valores de diferencial potencial encontrados en la hoja de especificaciones del fabricante cuyos valores se presentan en la Tabla 61.

Tabla 61 Tabla de valores para convertir la señal analógica en pH [53]

pH	V
0	2.745
1	2.57
2	2.39
3	2.21

4	2.03
5	1.855
6	1.68
7	1.5
8	1.33
9	1.155
10	0.975
11	0.8
12	0.62
13	0.445
14	0.265

Como primera función de membresía se utilizó una en forma trapezoidal “MB 14 a 11” con rangos de 0 a 1200 ya que de acuerdo con la resolución del microcontrolador al tener valores entre 0 a 1200 en el convertidor analógico-digital sería que la sustancia tiene un pH entre 11 y 14. El nombre hace alusión a que la sustancia es muy básica. La segunda función de membresía es de forma triangular “B 10 a 7” con un rango entre 1100 a 2200, ya que en dicho rango el pH estará entre 7 y 10 lo cual la haría una sustancia básica. La siguiente función de membresía es la de nuestro interés, de igual manera es de forma triangular “Lechuga 6.5 a 6” con un rango de 2165 a 2295 ya que el pH estaría entre 6 y 6.5 que es el rango en el cual se debe de mantener la solución nutritiva. La 4ta función de membresía es de forma triangular “A 6 a 3” con un rango de 2280 a 3000 lo que indicaría que la sustancia es ácida. Por último, la 5ta función de membresía es de forma trapezoidal “MA 3 a 0” con un rango de 2900 a 4095 ya que se tendría una sustancia muy ácida de 0 a 3.

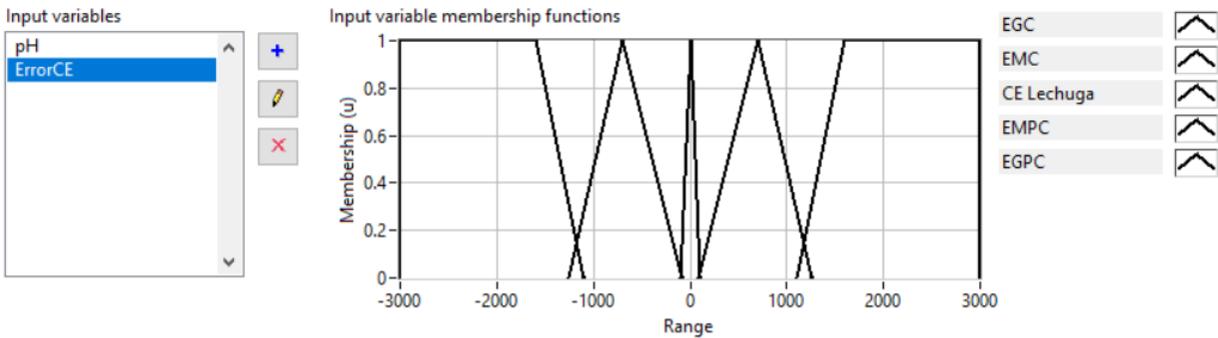


Figura 46 Funciones membresía del sensor de conductividad

La Figura 46 presenta las funciones de membresía de la variable de entrada del Error de conductividad. Esta variable de entrada significa que se tiene un valor de conductividad deseado al cual se le resta el valor de la medición del sensor y esto sería el error el cual queremos que sea 0. Cuando el error es negativo significa que, de acuerdo con la referencia, la solución nutritiva es más conductiva de lo esperado. Por el contrario, cuando el error es positivo significa que la solución nutritiva está por debajo del valor de conductividad esperado, o sea es menos conductiva de lo esperado.

Como primer función de membresía se utilizó una en forma trapezoidal “EGC” con rangos de -3000 a -1100, esto significa que el error es grande y que la solución nutritiva es muy conductiva. La segunda función de membresía es de forma triangular “EMC” con un rango entre -1250 a -90, el error ya no es tan grande con respecto al valor deseado y también refiere a que la sustancia es un poco más o conductiva de lo que se desea. La siguiente función de membresía es la de nuestro interés, de igual manera es de forma triangular “CE Lechuga” con un rango de -100 a 100, el rango es mucho más pequeño que el de las funciones anteriores ya que se desea que el error sea 0 o lo más cercano a ello. La 4ta función de membresía es de forma triangular “EMPC” con un rango de 90 a 1250, el error ahora es positivo por lo que la solución nutritiva es un poco menos conductiva de lo que se desea. Por último, la 5ta función de membresía es de forma trapezoidal “EGPC” con un rango de 1100 a 3000, el error es grande positivamente por lo que la sustancia es poco conductiva con respecto a lo que se desea.

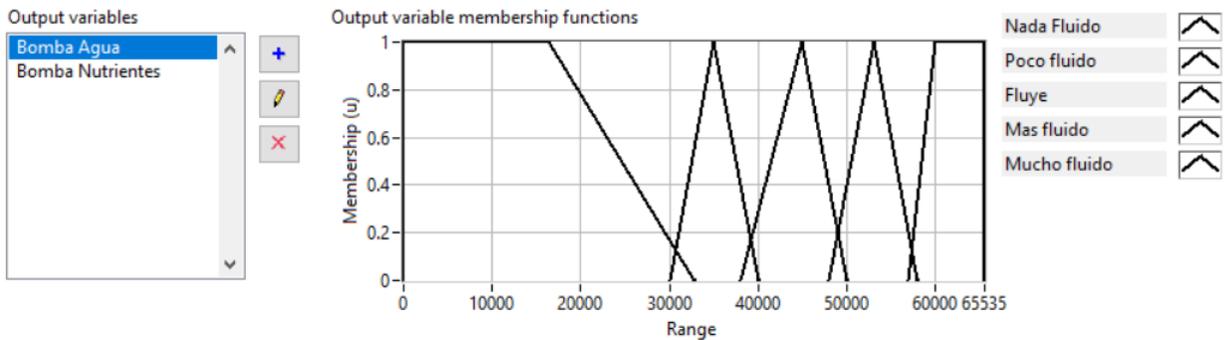


Figura 47 Funciones membresía de la bomba de agua

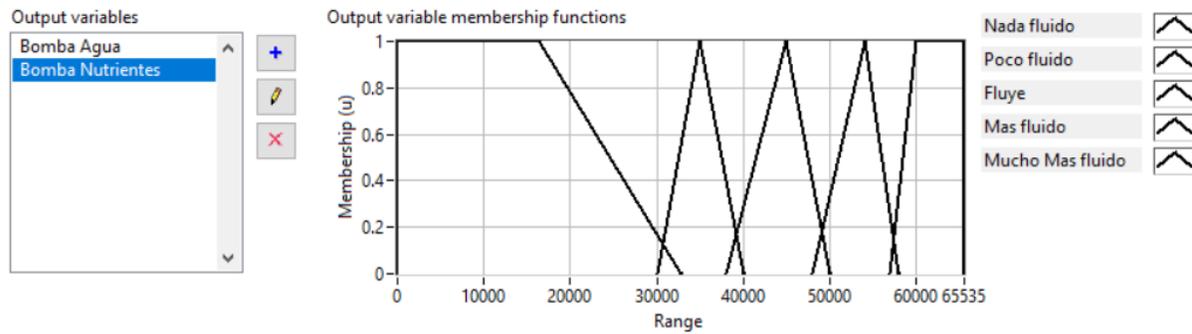


Figura 48 Funciones membresía de la bomba de nutrientes

La Figura 47 muestra las funciones de membresía de la variable de salida para la bomba de agua. La Figura 48 muestra las funciones de membresía de la variable de salida para la bomba de nutrientes. Estas dos variables de salida están en el universo de 0 a 65535 ya que el microcontrolador debe de enviar los valores de los bits que se requieren y estos serán posteriormente un voltaje que determinará el caudal de cada bomba.

Debido a que son variables que se comportaran de la misma forma dichas funciones de membresía no cambian por lo que ambas tienen las mismas. Como primer función de membresía se utilizó una en forma trapezoidal “Nada Fluido” con rangos de 0 a 32768, esto significa que la bomba no se prenderá, en dicho rango se tendría un valor de 0 a 6V por lo que la bomba no alcanza a prender (este valor puede cambiar debido a que no se cuentan con hojas de especificaciones y posteriormente se debe de realizar la caracterización de cada una de las bombas peristálticas). La segunda función de membresía es de forma triangular “Poco fluido” con un rango entre 30000 a 40000, donde se tendrá un voltaje de 7.3V donde la bomba ya se encenderá con un caudal pequeño. La 3er función de membresía de igual manera es de forma triangular, “Fluye” con un rango de 38000 a 50000, con este rango ya se tendrán 9V por lo que la bomba debe de tener un mayor caudal. La 4ta función de membresía es de forma triangular “Más fluido” con un rango de 48000 a 58000, donde se tendrán 10V para que la bomba incremente el caudal. Por último, la 5ta función de membresía es de forma trapezoidal “Mucho fluido” con un rango de 57000 a 65535, el caudal puede llegar al máximo en este rango.

Debido a que se utilizaron 5 funciones de membresía en cada variable, se establecieron 25 reglas difusas “si-entonces”. Esta parte del sistema de inferencia es la evaluación de reglas. Para la parte de desdifusificación se utilizó el método de centroide, como se muestra en la Figura 49 y también se utilizó el operador Intersección el cual es el operador lógico ‘y’ (AND) de Zadeh (min). Esta herramienta de LabView genera las reglas de forma automática y posteriormente se ajustan los valores o consecuencias para las variables de salida acorde a lo que se requiere para mantener la solución nutritiva dentro de los rangos requeridos. Básicamente con todas las reglas difusas se busca que si la sustancia presenta un nivel de acides o de alta conductividad se encienda la bomba de agua; por el contrario, si la solución nutritiva está más básica o con menos conductividad de lo requeridos, se encienda la bomba de concentrado de nutrientes. Lo que varía entre cada reglas es el caudal de las bombas, el cual se debe de ajustar a si la solución nutritiva está

muy por encima o muy por debajo de los valores deseados requerirá mayor caudal para alcanzar los valores deseados o si el desajuste de la solución nutritiva no es tan significativo el caudal de cada bomba deberá ser menor para evitar causar un desajuste mayor en la solución nutritiva. Todas las reglas utilizadas están en el anexo

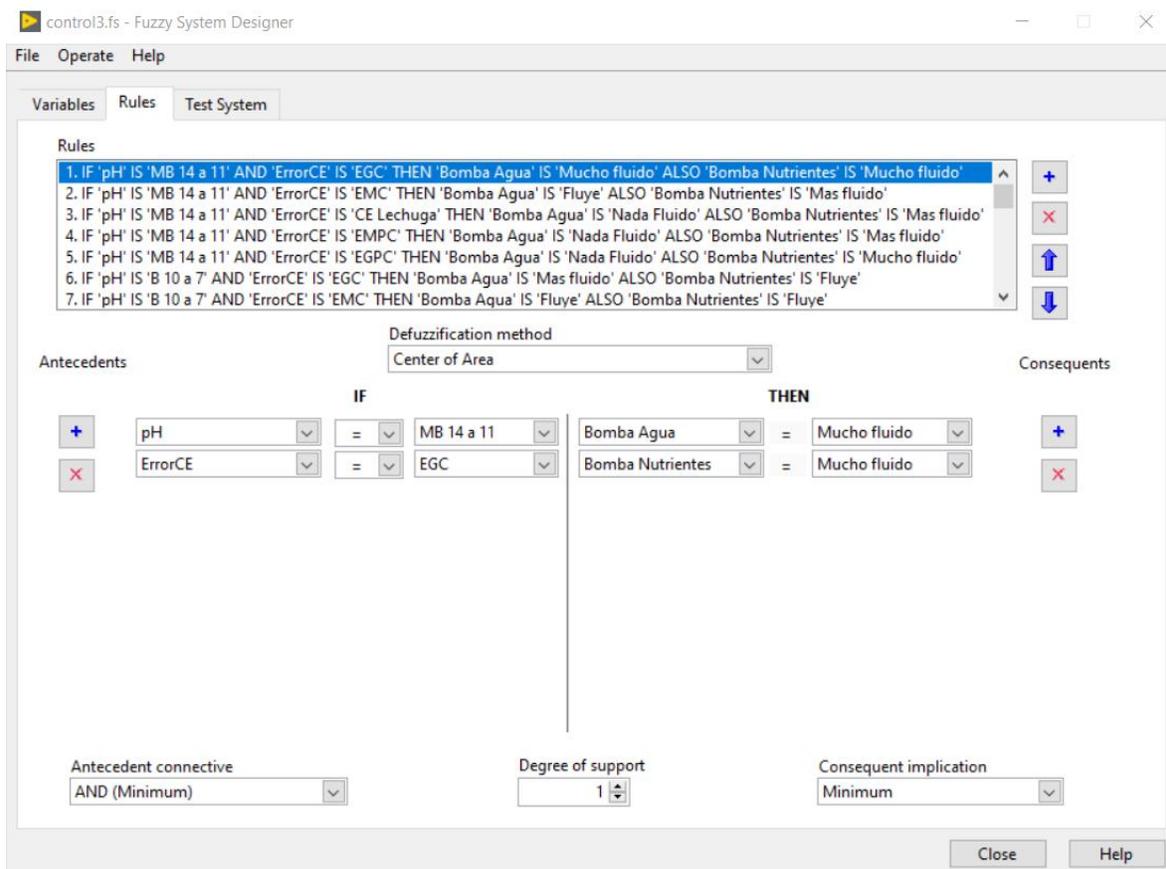


Figura 49 Reglas difusas utilizadas

Estas reglas establecen la relación entre las variables de entrada y las de salida, a partir de estas reglas se obtiene la superficie de control de cada salida como se muestra en la Figura 50 y la Figura 51. En la Figura 50, se muestra el comportamiento de la bomba de agua. Al observar la superficie de control, se aprecia en color azul rey cuando la bomba debe de trabajar al máximo de su caudal, la siguiente zona en un azul más claro es donde tiene un menor caudal debido a que el ajuste necesario no es tan grande como en el azul más fuerte. Y así continúa disminuyendo los valores del PWM, por ende, el caudal de la bomba. La zona roja es cuando la bomba no debe de encenderse. En dicha figura, se alcanza a observar el cursor (el rojo) que señala que si se tiene un pH entre 6 y 6.5; además del error de CE está en 0 no se requiere el encendido de la bomba de agua. La Figura 51 es exactamente lo mismo, pero de alguna forma está en espejo, ya que normalmente cuando la bomba de agua esté encendida al máximo, la bomba del concentrado de nutrientes estará apagada.

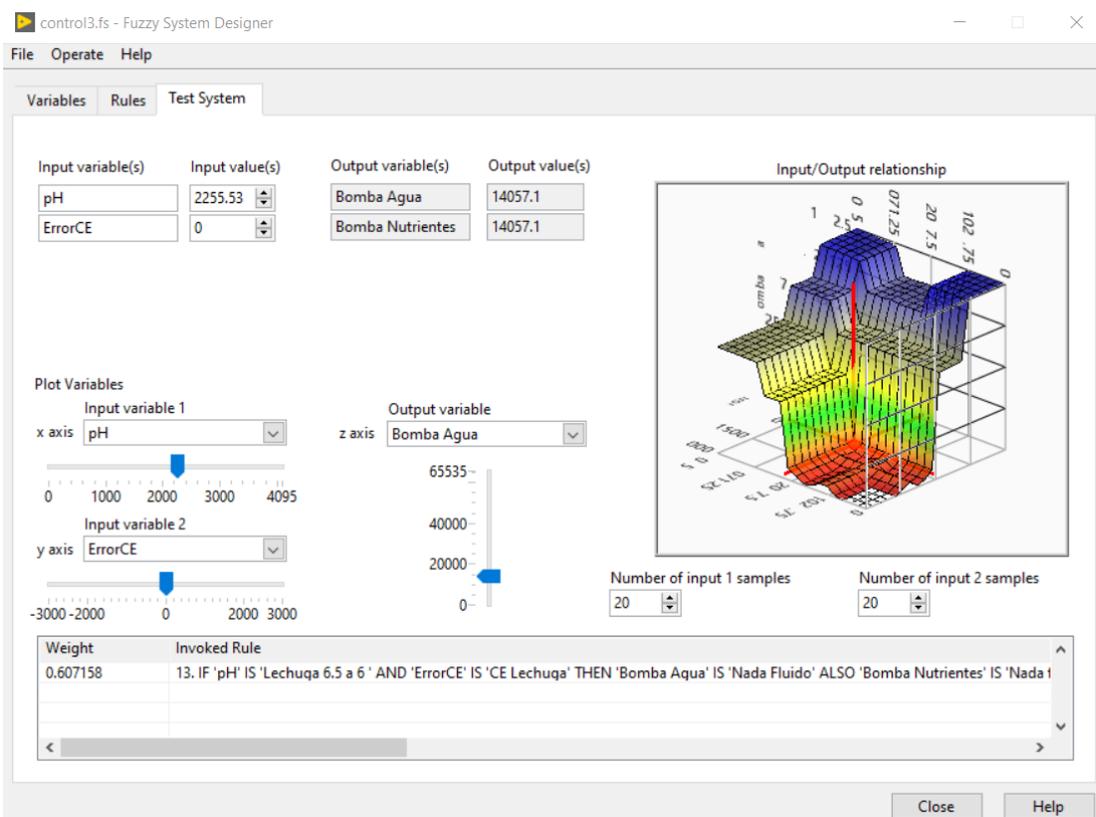


Figura 50 Superficie de control de la salida: bomba de agua

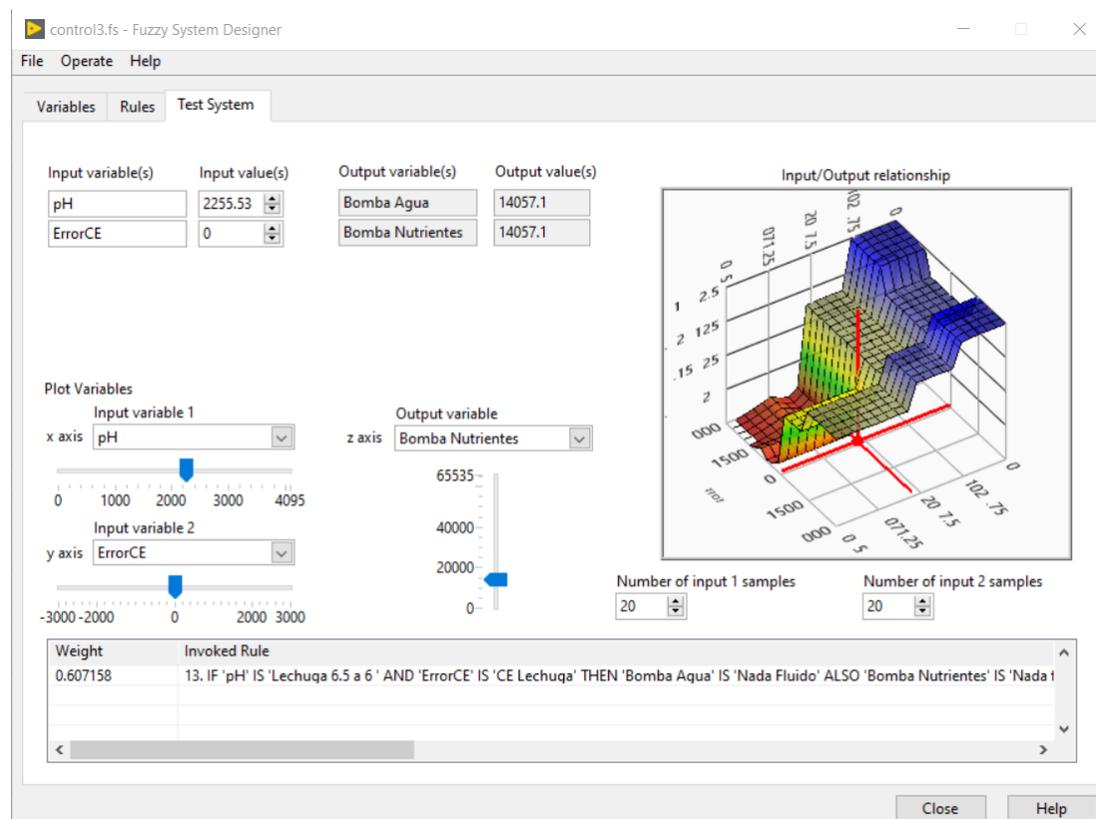


Figura 51 Superficie de control de la salida: bomba de nutrientes

Validación del sistema difuso mediante una *prueba del sistema*

En la Figura 52, se representa la simulación de los sensores de pH y conductividad, los cuales indican un valor de acidez elevado y de conductividad alta respectivamente, por lo tanto, para cambiar dicho valor de acidez y conductividad se requiere agregar más agua y la bomba del concentrado de nutrientes se mantiene apagada. Por el contrario, en la Figura 53, se representa la simulación de los sensores de pH y conductividad en valores básicos con baja conductividad, por lo tanto, para cambiar ese valor se requiere agregar concentrado de nutrientes y la bomba de agua se mantiene apagada. Ambas simulaciones se hicieron con un valor deseado de conductividad (set point CE) de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ representado con un 'slider' para poder ajustarlo al valor deseado de manera rápida.

El diagrama de bloques del sistema de prueba se muestra en la Figura 54. Es importante recordar que las bombas reciben la corriente de encendido aproximadamente en un valor de PWM de 32767.

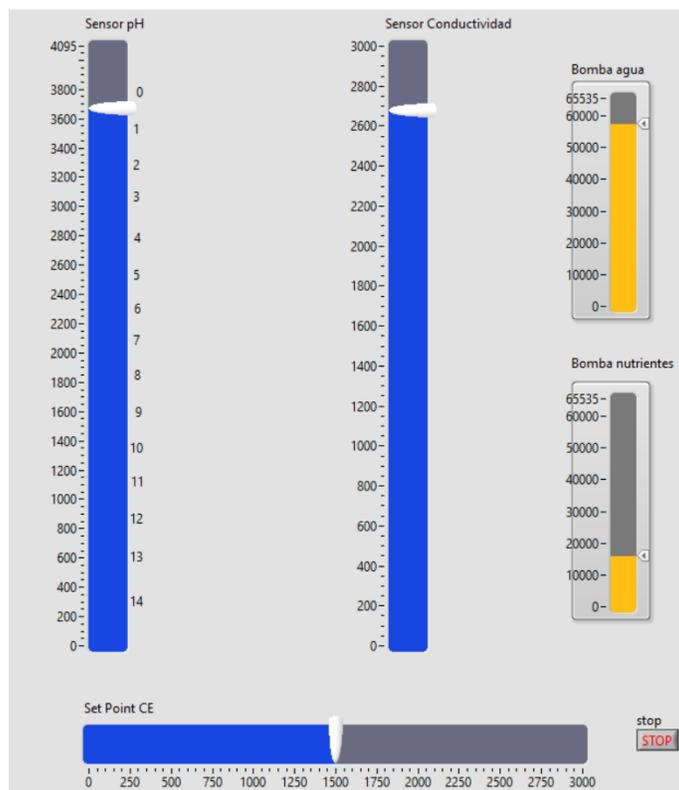


Figura 52 Representación del control difuso cuando la solución es ácida, valor pH de casi 0

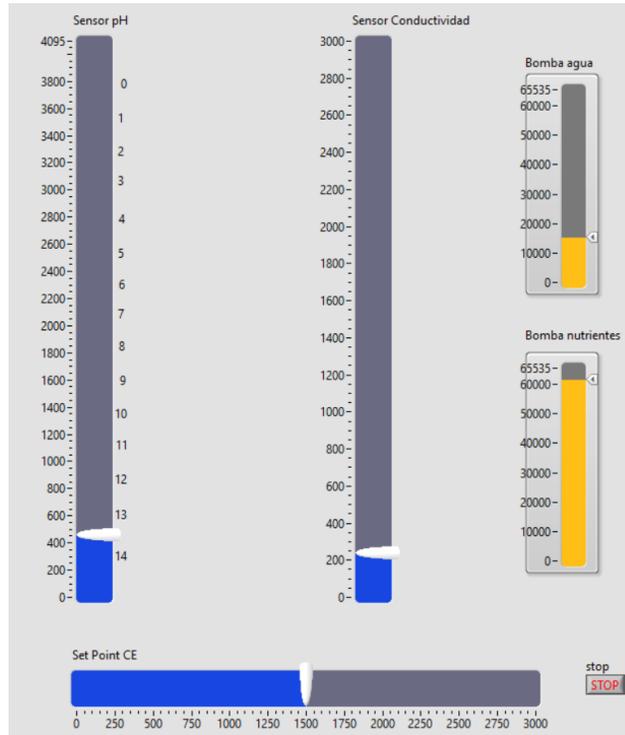


Figura 53 Representación del control difuso cuando la solución es básica (valor pH de casi 14)

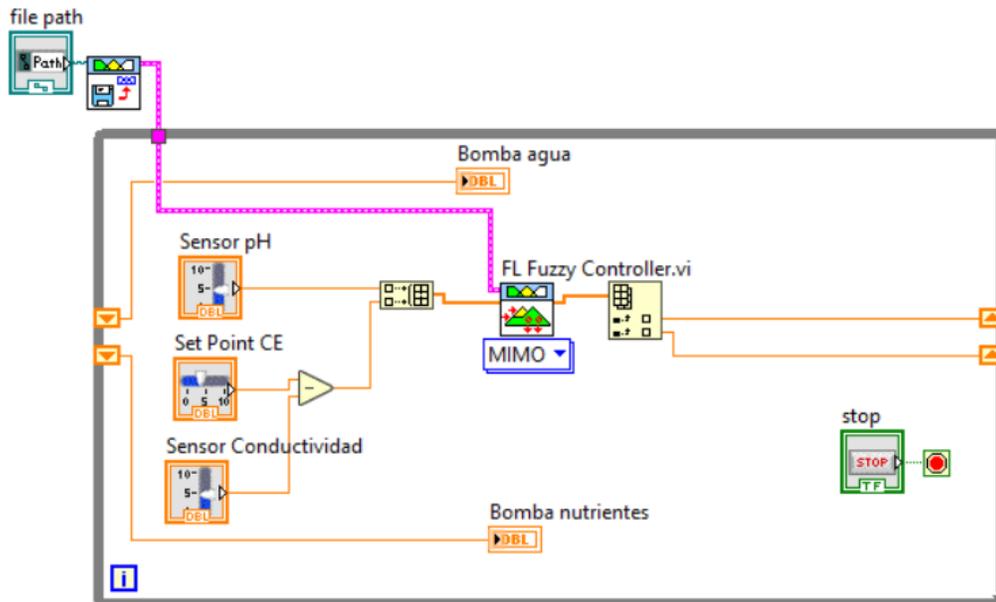


Figura 54 Diagrama de bloques de la prueba del sistema

En la Figura 54, se encuentra el bloque “FL Fuzzy Controller.vi” el cual es parte de las herramientas de “Fuzzy logic” que incluye Labview. Este bloque o bien subVI es propiamente el sistema de inferencia, este bloque se en carga de realizar las etapas desde la difusificación hasta la desdifusificación. Para desarrollar todas las etapas, el bloque debe recibir el control difuso creado con el asistente “Fuzzy system designer”,

también las variables de entrada (pH y errorCE) para obtener como salida los valores de las bombas. La difusificación es la etapa donde recibe los valores numéricos de la o las variables de entrada (universos de entrada) y convierte estos valores numéricos del plano certero al plano difuso. Posteriormente, realiza la evaluación de reglas difusas, donde se obtienen conjuntos difusos. Estos conjuntos difusos deben de cambiar a valores certeros por medio de la desdifusificación. Los datos de salida del sistema deben ser números reales y representativos de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado, es por eso que existen diferentes métodos de desdifusificación y arrojan resultados distintos, en este trabajo se utilizó el método de centroide como se mencionó anteriormente.

Una vez que se obtiene los valores de salida del bloque “FL Fuzzy Controller.vi”, estos se separan para obtener el valor tanto para la bomba de agua como para la bomba de concentrado de nutrientes; estos valores se retroalimentan por medio de “Shift register” el cual se encarga de mantener el valor anterior, de esta forma, en caso de manipular los valores de cada sensor, ambas bombas se ajustan a los nuevos valores obtenidos del bloque “FL Fuzzy Controller.vi”.

2.2.4 (S2) Sistema energético

Este se encarga de proveer al sistema de información (S3) y al sistema de manejo de solución (S1) de energía acondicionada según los requerimientos de cada dispositivo.

2.2.4.1 Acondicionamiento energético del S1

Módulo de concentración de solución

Los requerimientos energéticos de las bombas peristálticas son 12 V a 80 mA que se buscan controlar mediante una señal PWM de 3.3V con capacidad de otorgar 40 mA según las hojas de especificaciones del microcontrolador, de modo que el circuito de acoplamiento propuesto es un circuito integrado ULN2003 el cual tiene 7 salidas independientes cada una conformada por un arreglo Darlington, Figura 55.

Dadas las características del circuito se espera un consumo de corriente de base de 1 mA aproximadamente, siendo capaz de manejar máximo 500 mA por canal.

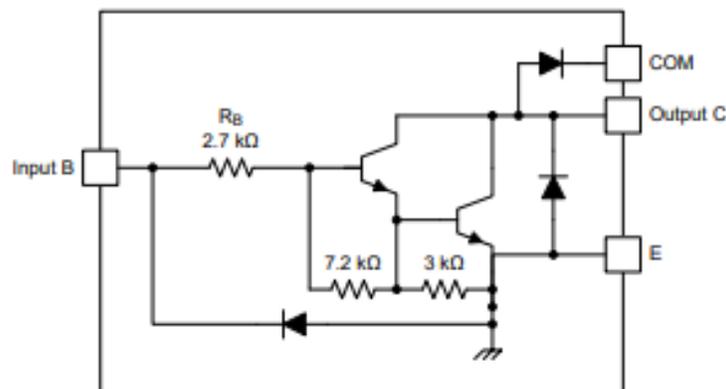


Figura 55 Diagrama de un circuito de salida del ULN2003

Módulo de flujo de solución

Para poner en marcha la bomba principal y la bomba de oxigenación mediante una señal de 3.3 V se propuso un módulo de 2 relevadores mecánicos de 2 canales, cuya señal de activación está en el rango de lógica TT, el cual implementa un aislamiento eléctrico del circuito de control y el de corriente alterna mediante un circuito de opto acoplamiento. El consumo esperado de corriente del relevador es de 20 mA por relevador y de alrededor de 3 mA en el circuito de opto acoplamiento.

Sin embargo, para la implementación se optó por un relevador estado sólido para este módulo, pues, ofrece prestaciones superiores en cuanto a evitar interferencia eléctrica, aspecto que adquiere relevancia al no contar con un osciloscopio durante la implementación del proyecto.

2.2.4.2 Acondicionamiento energético del S3

Módulo de medición

Dado el consumo de tensión y corriente de los sensores, estos pueden ser alimentados directamente desde la salida de 3.3 V de tensión que proporciona el regulador de la tarjeta de desarrollo.

Sensor de nivel

Este sensor al ser equivalente a un interruptor puede trabajar con la señal que se le suministre a una de sus terminales, por lo que es recomendable utilizar un resistor de pull up o pull down para tener una señal estable en todo momento a la entrada del circuito de procesamiento como se muestra en el diagrama de la Figura 56.

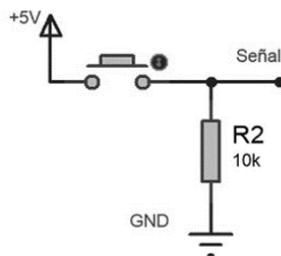


Figura 56 Acondicionamiento típico mediante un resistor de “pull down”

Módulo de procesamiento

La tarjeta de desarrollo Wemos D1 R32 (UNO EP32) cuenta con circuito basado en el regulador de voltaje de conmutación MP1482 que le permite ser conectada a una fuente de 12 V a partir de la cual pueden tomarse 5 V con una corriente máxima de salida de 2 A conectada a su vez a un regulador AMS117 de 3.3 V con una corriente máxima de salida de 800 mA (según su hoja de especificaciones) para alimentación del microcontrolador y los periféricos alimentados por 3.3V

Consumo total de corriente de los dispositivos alimentados por 3.3 V: 91.7 mA

Consumo de corriente de los dispositivos alimentados por 5V: 40 mA

En cuanto al funcionamiento del microcontrolador la corriente acumulada máxima de salida IO con la que puede trabajar es de 1200 mA, [54] por lo que el consumo de los sensores entra muy debajo de los límites del microcontrolador y del regulador AMS117

2.2.4.3 Consumo energético del sistema

En la Tabla 62 se describe el consumo de energía de cada uno de los dispositivos del sistema excepto por el circuito de alimentación de respaldo.

Tabla 62 Consumo energético esperado de los componentes de CD del sistema

Módulo	Componente	Tensión	Corriente de operación
M4 Procesamiento	Tarjeta de procesamiento	12 V	*500 mA
M3 Medición	Sensor de pH	3.3 V	18.7 mA
	Sensor de CE	3.3 V	43 mA
	Sensor de temperatura y humedad	3.3 V	2.5 mA
	Sensor de nivel (x3)	3.3 V	3.3 mA
	Dispositivo RTC	3.3 V	0.2 mA
M2 Concentración de solución	Bomba peristáltica (x2)	12 V	80 mA
	ULN2003	3.3 V	1 mA
M1 Flujo de solución	Relevador (x2)	5 V	20 mA
	Opto acoplamiento (x2)	3.3 V	3 mA

*Corriente recomendada proporcionada por la fuente [54].

La bomba principal y la bomba de oxigenación se alimentan de la misma tensión nominal que la red eléctrica 127 V_{AC} a 60Hz, por lo que no es necesario una etapa de

acondicionamiento eléctrico de su alimentación, aunque, si se requiere una etapa de potencia para acondicionar la señal de control cuestión que se abordó en la sección 4.2 (Acondicionamiento de S1) proponiendo un circuito basado en un relevador mecánico cuyo consumo de DC es el que se representa en el módulo 1 de la tabla anterior.

2.2.4.4 Fuente de alimentación

Según la Tabla 62, existen 3 niveles de tensión requeridos por los elementos de corriente directa, 12 V, 5 V y 3.3 V, como se mencionó en el aparatado de acondicionamiento del módulo de procesamiento la tarjeta de desarrollo cuenta con reguladores de tensión que permiten tomar 5 V y 3.3 V de la tarjeta por lo que la corriente que esta proporciona a los sensores está considerada en el consumo de la misma tarjeta. Por lo que la fuente de alimentación provee energía para la tarjeta, las dos bombas peristálticas y el circuito de respaldo del cual se esperan un consumo de 40 mA aproximadamente por la corriente consumida por el relevador, de modo que el consumo total esperado es de 700 mA

Tabla 63 Atributos de la fuente de alimentación

Función principal	F 6. Gestionar la energía
Funciones relacionadas	F 7.1 Proteger eléctricamente al sistema
Restricciones	R12.1 Protección eléctrica
Objetivo	Ser capaz de proveer al menos la energía máxima requerida por todo el sistema.
Variables libres	Componente

Selección de fuente de alimentación

Las dos principales variantes de fuentes de alimentación AC-DC son la fuente regulada lineal y la fuente conmutada, esta última es más común comercialmente debido a su alta eficiencia, así como un peso y tamaño reducidos y una menor generación de calor en comparación con la fuente lineal equivalente [55].

Si bien los adaptadores o eliminadores comerciales también son fuentes de alimentación conmutadas y son económicos, son fuentes externas cuyas especificaciones técnicas son difícilmente publicadas por el fabricante, pues son diseñadas para usarse en un dispositivo en particular más que para propósitos generales lo que dificulta conocer su rango de operación o si poseen elementos de protección eléctrica.

De modo que de acuerdo con los atributos planteados en la Tabla 63 se propusieron 3 modelos de fuentes conmutadas en presentación de panel de montaje con una tensión

de salida de 12 V y con una corriente de salida mayor a 1.05 A considerando un factor de seguridad de 1.5 sobre la corriente máxima de DC que podría consumir el sistema.

Validación mediante AHP

Se implementó la herramienta multicriterio AHP a las 3 soluciones tomando en cuenta los criterios: C1. Elementos de protección eléctrica, C2. Peso y C3. Costo. Dicha evaluación comienza con la matriz principal (Tabla 150 Anexo B.4 S1 Sistema Energético) a partir de la cual se obtiene el siguiente vector de prioridad, Tabla 64.

Tabla 64 Vector de prioridad

Cr1	0.49
Cr2	0.31
Cr3	0.20

Las soluciones que se propusieron fueron S1. CDMX Electrónica: JC-36-12, S2. CDMX Electrónica: JC-25-12 y S3. CZC: A-50FAL-12 cuyas características se muestran en la Tabla 160. El desempeño de estas se muestra en la Tabla 65, a partir de cuya ponderación se seleccionó la solución S2.

Tabla 65 Resultado AHP de la fuente de alimentación

Solución	Ponderación
S1	0.355
S2	0.446
S3	0.199

2.2.4.5 Circuito de respaldo de energía

En caso de una interrupción inesperada del suministro energético del sistema se propone colocar un circuito de alimentación de emergencia con el objetivo de que el sistema de control pueda entrar en un estado de pausa parcial y sea capaz mostrar un aviso en la interfaz de usuario informando la situación a fin de que el usuario pueda realizar ajustes de manera manual en caso de ser necesarios.

El circuito propuesto se basa en un relevador de un polo con dos tiros activado mediante un transistor, de manera que al verse interrumpido el flujo de energía la batería suplirá el funcionamiento de la fuente a la vez que un LED, cuyo objetivo es ser un indicador visual del funcionamiento de la fuente, se apagará y se enviará una señal digital al módulo de procesamiento. Una simulación del circuito de respaldo propuesto se muestra en las siguientes dos figuras.

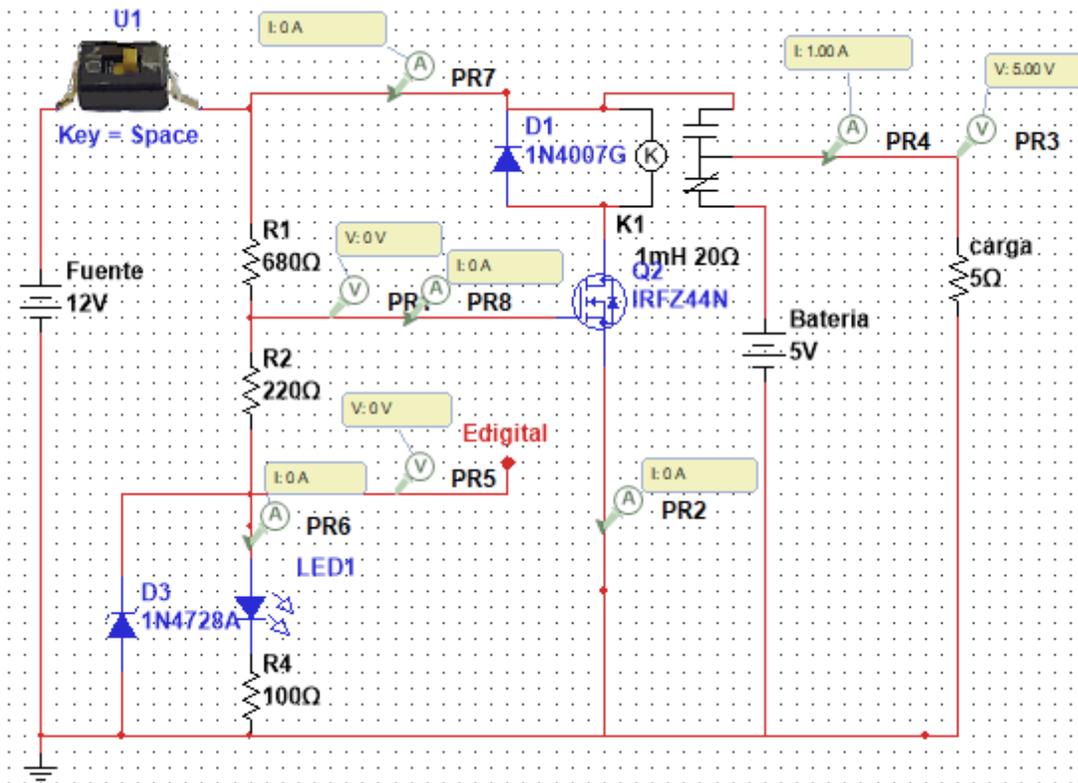


Figura 57 Circuito de respaldo de energía cuando la alimentación principal no está en funcionamiento

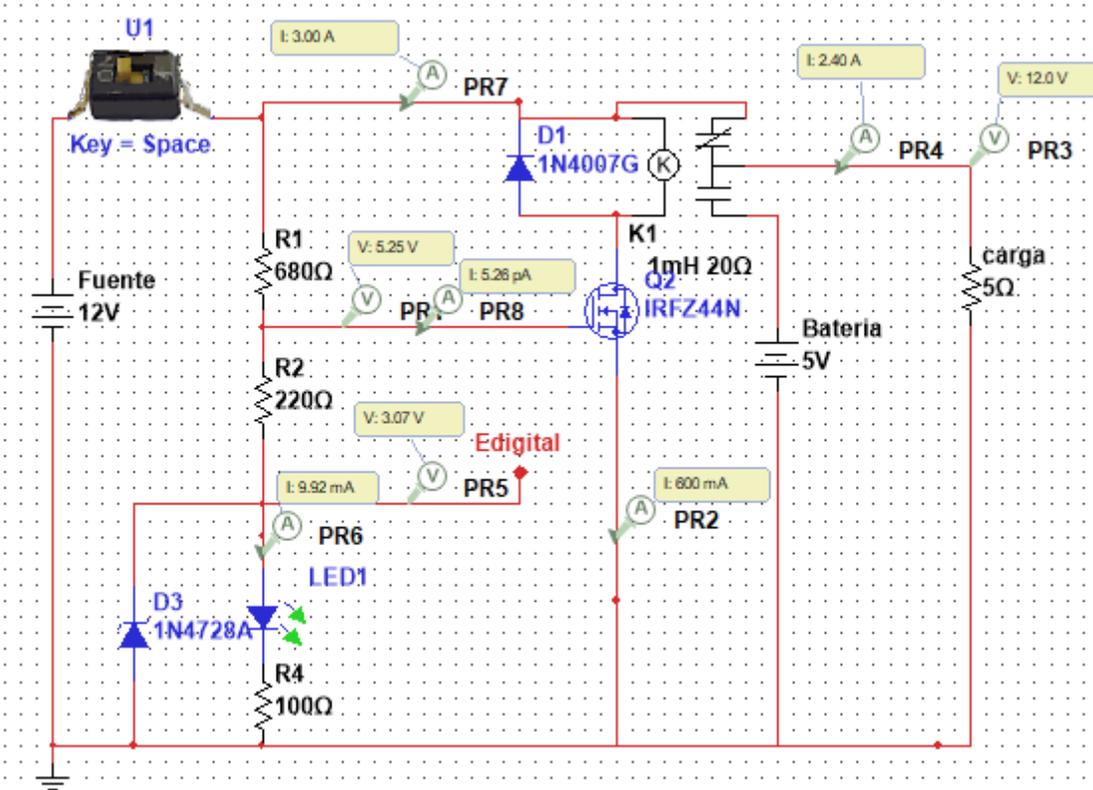


Figura 58 Circuito de respaldo de energía cuando la fuente de alimentación funciona correctamente

La Figura 58 muestra algunas mediciones de tensión y corriente en diversos puntos del circuito mientras la fuente de alimentación está funcionando y el LED indicador este encendido, mientras que en la Figura 57 se muestra el estado del circuito cuando la alimentación de 12V ha sido interrumpida, lo que ocurre principalmente es que el indicador se apaga y la batería supe el funcionamiento de la fuente a partir del circuito de carga que representa el consumo del sistema.

El consumo de la parte del sistema que permanecerá energizado, en caso de un corte en la energía, se ha remplazado por una resistencia de carga de cinco ohm con el fin de representarlo como el elemento de mayor consumo de corriente en todo el circuito, pero el consumo de corriente de esta sección y del circuito de relevador dependen de las características del dispositivo particular a utilizar.

2.2.4.6 Batería de respaldo

La implementación de una batería de respaldo permite al sistema mantener la comunicación con la interfaz de usuario cuando ha ocurrido un corte de energía, de modo que el usuario pueda estar informado de la situación y pueda tomar acciones como realizar un riego manual en caso de considerarlo necesario.

El módulo de procesamiento consume una corriente máxima de 250 mA y puede alimentarse con 7 a 16 V mediante su terminal Vin o mediante una fuente de 5 V a 500 mA máximo, mediante su terminal microUSB.

Se consideraron inicialmente 2 tipos de baterías, las baterías recargables de polímero de litio (Li-Po) y las de ion de litio (Li-Ion) cuyas diferencias principales son además de su composición, son su costo y forma de empaquetado. Las baterías Li-ion son más económicas y tienen una forma muy similar a las pilas AA.

Una unidad de batería Li-Ion modelo 18650 proporciona una tensión nominal de 3.7 V con una corriente de 2200 mAh. A fin de que sean compatibles con la alimentación del módulo se hacen 2 propuestas.

Mediante la terminal Vin: para poder usar esta terminal que es necesario una fuente de al menos 6V, lo que se consigue utilizando 2 baterías de Li-Ion en serie.

Por la terminal microUSB: ya que esta terminal permite una alimentación de 5 V se propone una sola batería de 3.7 V y un circuito elevador de tensión, para su implementación es necesario agregar un relevador al circuito de acoplamiento, a fin de hacer el cambio de terminal de alimentación de la terminal Vin a microUSB.

Selección

Ambas propuestas proporcionan 2200 mAh al circuito, de modo que considerando un consumo máximo de corriente de 250mA según las especificaciones proporcionadas por los proveedores se espera que el módulo de procesamiento pueda permanecer activo al menos 8h con 48 min en ambos casos.

Validación

Las baterías sean retiradas cada cierto tiempo para ser recargadas por un usuario, para ser realizado correctamente en ambas opciones se considera un circuito de recarga.

2.2.5 (M6) Interfaz Gráfica

2.2.5.1 Diseño de la interfaz gráfica de usuario

Para el diseño de la interfaz gráfica de usuario se siguieron las etapas mencionadas en la guía de diseño centrado en el usuario, usuario limitando el desarrollo hasta la etapa de evaluación de diseño contra requerimientos, descrita por el estándar ISO 13407:1999 [56], así como *The Field Guide To Human-Centered Design*, escrita por IDEO [57]. Dichas etapas se pueden observar en la Figura 59 y descritas a continuación.

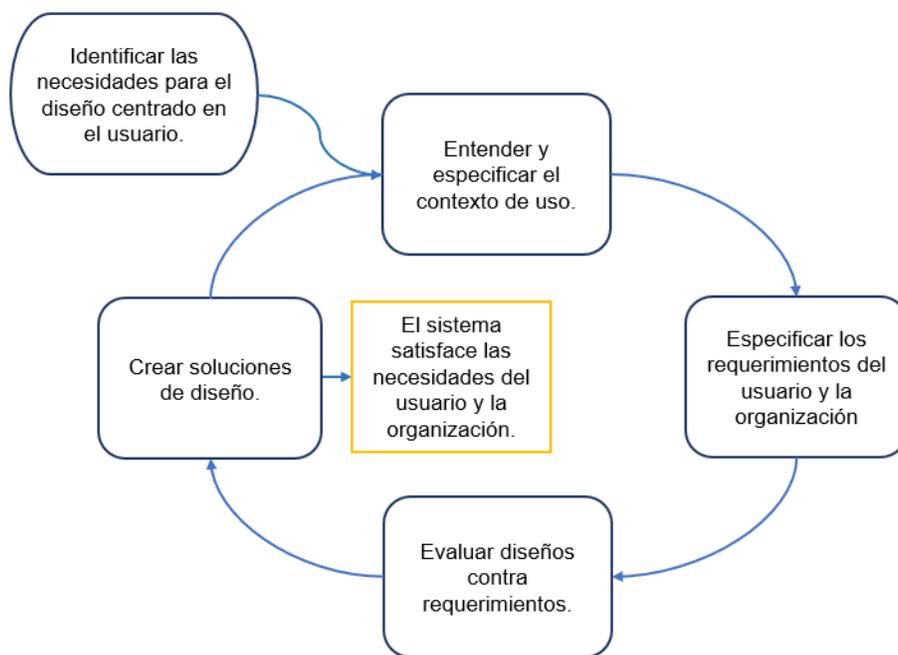


Figura 59 Etapas del diseño de una interfaz gráfica [57]

- **Identificar las necesidades para el diseño centrado en el usuario**

En la búsqueda de conocer más acerca del usuario y saber que problemas enfrenta como agricultor urbano de cultivos hidropónicos de lechugas, se elaboró un mapa de empatía el cuál se muestra en la Figura 60. Éste permitió personalizar y caracterizar el diseño de la interfaz, establecer los requerimientos del usuario y las características de las herramientas a emplear para su desarrollo, así como formular una propuesta de valor para presentársela posteriormente.

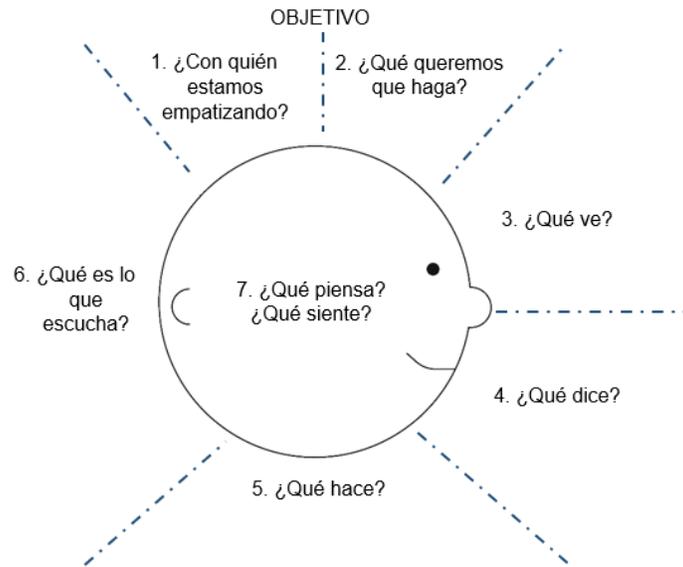


Figura 60 Mapa de empatía

1. El usuario objetivo es un productor local de lechugas hidropónicas en la zona de Tláhuac, el cuál aproximadamente tiene una instalación para 200 Lechugas. Él es el único trabajador de tiempo completo involucrado en la producción y cuidado de los huertos hidropónicos.
 2. Se busca que el usuario sea capaz de monitorear aspectos esenciales desde el trasplante de las lechugas en los canales hidropónicos hasta el término de su etapa de desarrollo con una herramienta que le sea fácil de usar y le beneficie, brindándole mayor flexibilidad para atender otras tareas simultaneas a lo largo de su jornada laboral
 3. El usuario tiene conocimiento que hay empresas que se dedican a automatizar procesos, también sabe que existen productos tecnológicos que se pueden emplear en huertos hidropónicos.
 4. El usuario cree que por tener huertos hidropónicos relativamente de capacidad baja no existe una forma de automatizar los procesos que lleva acabo.
 5. El usuario se dedica a cuidar tres instalaciones de cultivos hidropónicos que se encuentran distribuidos en diferentes áreas. Constantemente se ve interrumpido a lo largo del día para checar algunas cuestiones en cada uno de los cultivos, así mismo realiza venta y entregas de las lechugas a cafeterías y restaurantes pequeños de la zona.
 6. En ocasiones sus clientes no eligen las lechugas más pequeñas o las que no tienen un color uniforme para ellos. Por otra parte, si llega a necesitar personal de apoyo que lo cubra cuando realiza entregas o necesita hacer alguna otra actividad durante el día no siempre recibe una respuesta afirmativa o constantemente le solicitan información del cómo hacer las tareas o que hacer mientras él no se encuentra.
 7. El usuario piensa que de ser posible tener una herramienta que lo ayude podría hacer más cosas o mejorar sus ventas. Sin embargo, tiene miedo de que no pueda entender cómo funciona la implementación de una solución.
- **Entender y especificar el contexto de uso.**

Se definió la misión que tiene la interfaz gráfica de usuario en la implementación del sistema de regulación automático, como la siguiente: Tener un nivel adecuado de usabilidad para respaldar de manera efectiva el monitoreo de las variables de interés para el usuario, el inicio de rutina de regulación y su funcionamiento normal y anormal durante la puesta en marcha del sistema de regulación automático, así como el apagado de este.

Se identificaron una serie de tareas que el usuario realiza durante sus horas laborales en los cultivos hidropónicos con el objetivo de cumplir con la misión anterior y considerar la información obtenida para posteriormente poder especificar el contenido de las pantallas en la etapa de diseño de soluciones. Para recabar dicha información fue necesario acordar con el usuario una visita presencial a su lugar de trabajo para observar las tareas que realiza, las condiciones en las que las lleva a cabo, como las realiza, en que orden las realiza y algún otro detalle que lográramos identificar. En la Tabla 66 se muestra una lista de las tareas identificadas. Posteriormente se clasificaron en tareas que realiza el usuario previo al periodo de cultivo, durante el periodo de cultivo y al término del periodo de cultivo. Además, se agregó un apartado para capturar otros detalles que se consideraron importantes.

Tabla 66 Tareas del usuario

Tareas del usuario (Productor u operadores)	
Previas al periodo de cultivo.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desmonta parte de la estructura de PVC para su limpieza posterior. ▪ Lava los tubos de PVC y los contenedores cada que se comienza una nueva cosecha. ▪ Retira de las charolas con tierra las lechugas que están listas para ser traspasadas al sistema hidropónico. ▪ Prepara el concentrado de solución de nutrientes en un contenedor. ▪ Llena un contener exclusivo con agua de llave.
Durante el periodo de cultivo.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mide el pH y CE del concentrado de solución nutritiva, agua y solución nutritiva de riego. ▪ Prepara la solución nutritiva de riego en un tanque principal que suministra la solución a los cultivos hidropónicos.

- Enciende la bomba por un lapso de 2 horas para suministrar la solución nutritiva a los cultivos hidropónicos.
- Apaga la bomba por un lapso de 1 a 2 horas dependiendo de la temperatura de ese día.
- Apaga la bomba cuando es de noche (21:00 p.m.)
- Observa del nivel de la solución nutritiva en el contenedor principal cada que realiza una medición en el tanque principal.
- En caso de que el nivel de solución nutritiva de riego sea bajo prepara más solución nutritiva de riego y eleva el nivel.
- En caso de que se presente una lectura no deseada de pH y CE agrega agua o concentrado de solución nutritiva para regular dichos valores y alcanzar los ideales.
- Supervisa los cultivos hidropónicos que se encuentran colocados en diferentes espacios dentro de su lugar de trabajo.
- De vez en cuando revisa en su teléfono la temperatura de la Ciudad de México.
- En caso de tener que realizar una entrega de productos lo suplente otro operador con menor capacitación y únicamente para ciertas tareas.

<p>Al término del período de cultivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Retira todas las lechugas de los tubos de PVC. ▪ Selecciona las lechugas con buen desarrollo para la venta por unidad el resto para la elaboración de ensaladas. ▪ Realiza la entrega de lechugas y germen a los pequeños restaurantes y cafeterías locales de la zona de Tláhuac de quienes es distribuidor.
<p>Otros detalles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El espacio es reducido, únicamente el operador puede caminar por los pasillos que rodean al cultivo hidropónico. ▪ El espacio de trabajo tiene contenedores de líquidos todo el tiempo. ▪ Los cultivos hidropónicos no están en un mismo lugar, el usuario tiene que subir y bajar escaleras para llegar a algunos cultivos. ▪ Los cultivos hidropónicos se encuentran dentro de estructuras tipo invernadero. ▪ Las condiciones ambientales pueden llegar a ser ligeramente diferentes para cada uno de los cultivos. ▪ A veces los operadores suplentes no están disponibles y el operador principal tiene que suspender las actividades en los cultivos o descuidarlos hasta estar devuelta después de haber realizado otras actividades ese mismo día. ▪ Existe una diferencia de edad entre operadores.

Con ayuda de la Tabla 66 se logró deducir que el usuario principal esta mayoritariamente familiarizado con todas las tareas que implica el proceso de cosecha de lechuga hidropónica, mientras que los otros usuarios posibles, realizan solo ciertas tareas. No obstante, dichos usuarios cuentan con los conocimientos para entender el proceso completo que se lleva a cabo y las cuestiones esenciales que deben de estar monitoreando. Los factores de frecuencia y tiempo que necesitan algunas tareas como la medición de las variables de pH, CE, y la observación de los niveles de presencia de

líquido en los diferentes contenedores para la solución nutritiva de riego, el concentrado de solución nutritiva y agua, hacen que el usuario necesite saber la hora actual del día y recordar en el transcurso de este los valores medidos o bien anotarlos en alguna libreta. Es importante recalcar que el usuario principal no siempre está disponible para monitorear las condiciones de sus cultivos porque realiza la tarea de repartición o venta del producto. Por otro lado, las áreas de trabajo de los usuarios se pueden describir como lugares reducidos, distribuidos en diferentes zonas del inmueble, con contenedores de líquido en sus interiores y con iluminación natural. También dichas áreas solo tienen lo esencial para los cultivos hidropónicos, carecen de tecnología digital en ellos o su alrededor.

- **Especificar los requerimientos del usuario y la organización**

El usuario requiere una interfaz para monitorear el estado del sistema, la temperatura y humedad del ambiente, así como el pH y CE de la solución nutritiva que circula para las plantas. A su vez, también saber si hay suficiente agua y concentrado de nutrientes para realizar el control de pH y CE en caso de que se requieran de estas sustancias.

Para la realización de la interfaz es necesario contar con un proveedor de alojamiento para almacenar todos los archivos que constituyen el sitio web. Además de decidir el nombre del dominio de la página web.

Para el desarrollo de la interfaz se necesita un editor de texto, en este editor de texto es donde se generarán los códigos de los archivos del sitio web y de la base de datos. Esta base de datos es requerida para poder consultar las variaciones de las mediciones en cierto periodo de tiempo con el fin de corroborar que la solución nutritiva se mantenga en los rangos de pH y CE requeridos.

Para que el usuario tenga acceso a la interfaz, es necesario contar con algún buscador web y contar con acceso a internet en el dispositivo que utilice ya sea algún teléfono celular o computadora.

- **Evaluar diseños contra requerimientos**

Se consultó la Guía de recomendaciones para diseño de software centrado en el usuario [58]. Complementariamente se tomaron las siguientes consideraciones y recomendaciones para el diseño planteadas por J-Y Fiset. en [59] para la propuesta de diseño de la interfaz.

Percepción visual

El ángulo de visión puede ser expresado en minutos de arco, de acuerdo con J-Y, Fiset el ángulo de visión requerido para aplicaciones como el control de procesos varía entre los 16 a 22 minutos de arco, esto se ejemplifica en la Figura 61. Para el diseño de la interfaz se consideraron 22 minutos ya que este dato se ve involucrado para el cálculo del tamaño de letra. Se debe tener en cuenta que la edad del espectador puede influir en que se realicen modificaciones posteriormente ya que a medida que las personas

envejecen, la agudeza visual disminuye por lo que el operador u operadores podrían requerir una mayor altura de caracteres y mayor iluminación.

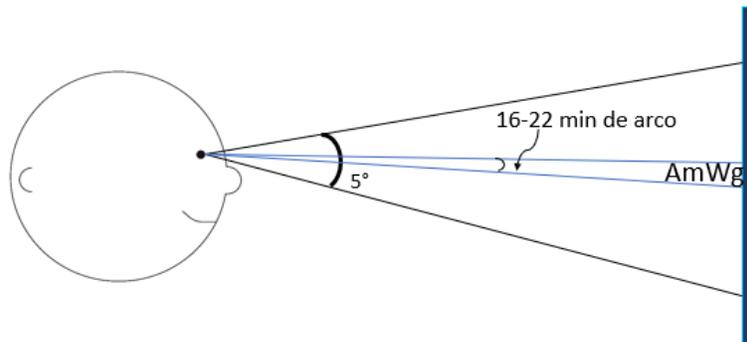


Figura 61 Ángulo de visión requerido para aplicaciones

Otro dato relevante en el cálculo del tamaño de la letra es la distancia a la que encuentra el espectador de la pantalla para tener una visión adecuada de la misma. Para calcular el tamaño se utiliza la ecuación (5.1), descrita por Jean-Ives F. [59], donde H representa la altura del carácter en centímetros, A el ángulo de visión en minutos, y D la distancia de la pantalla en centímetros.

$$H = \frac{AD}{3438} \quad (5.1)$$

El sistema está planteado para ser usado por un agricultor urbano con más de 6 años de experiencia y por algunos operadores suplentes con conocimientos básicos en los cultivos hidropónicos de lechugas. Para que el diseño de la interfaz y distancia pueda ser considerada como ergonómica se revisaron los datos obtenidos en el estudio “Antropométrico de la población mexicana masculina laboralmente productiva” [60] y en el estudio “Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana” [61] en los apartados correspondientes a la población mexicana masculina que ejercen trabajos industriales. Dichas estadísticas van desde peso, estatura hasta dimensiones de las extremidades superiores e inferiores del cuerpo. Ambos estudios cuentan con dimensiones antropométricas de la persona en posición de pie y sentada. Cabe mencionar que los estudios fueron aplicados solo a una cantidad de personas siendo este una muestra representativa tomada en ambos casos por muestreo aleatorio simple. Para el caso del primer estudio se obtuvo una longitud de brazos extendidos de 72.35 cm y para el segundo estudio una longitud de 74.80 cm. Para fines de diseño consideraremos la máxima longitud promedio de brazo de un operador mexicano.

Se obtiene el tamaño de la letra reemplazando los datos de ángulo y distancia en (5.2) como a continuación se muestra:

$$H = \frac{(16 \text{ min})(74.80 \text{ cm})}{3438} = 0.35 \text{ cm} = 3.5 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Al momento de diseñar la interfaz y programarla se tendrá en cuenta el tamaño de letra obtenido para facilitar la lectura de los datos importantes.

Flujo (materia, energía o información)

- Recomendaciones: El flujo debería ser normalmente de izquierda a derecha o de arriba a abajo. Cada nivel de navegación debe significar mayor nivel de detalle y el contenido debe ser progresivo acorde a la navegación.

Se debe capturar la atención al usuario sobre la información importante, por lo tanto, la ubicación y visualización debe estar diseñada para resaltar lo relevante y distinguirlo de lo que no lo es.

Se debe brindar información y servicios acorde al objetivo aprovechando diferentes recursos visuales para expresar el contenido (fragmentaciones del texto como frases, párrafos, tabulaciones, listados, tabla) y utilizar objetos de interacción como menús, ventanas, capas entre otros, para sintetizar espacio.

Propuesta:

La ventana principal de la interfaz está dividida en tres secciones. En la parte superior se encuentra una imagen representativa del campo de aplicación para la que se está utilizando la interfaz y las variables que el sistema no controla sin embargo son de utilidad para el usuario en la toma de decisiones. La segunda sección engloba los parámetros de mayor importancia esta brinda información principal que el usuario requiere como los valores de pH, CE y las alarmas del nivel de líquido en los diferentes contenedores para la solución nutritiva, el concentrado de solución y el agua. La tercera sección corresponde a información adicional del sistema de control que pudiera ser de interés para el usuario. En cada una de estas secciones se procurará sintetizar la información lo más posible, se usará una segunda ventana para presentar más datos de lecturas previamente obtenidas

Actualización de datos

- Recomendaciones: Debe brindarse al usuario una forma para identificar situaciones en las que la fuente de datos (por ejemplo, la red, el sensor o el transmisor) no está actualizada o no está disponible. Se debe dar acceso por otros medios a valores anteriores que para el operador puedan ser de utilidad.

Propuesta:

En el caso que el dispositivo del usuario no pueda conectarse a la red, este no podrá tener acceso a la página web y le aparecerá una leyenda de error al cargar la página. Por otro lado, si el usuario quiere conocer las lecturas de las variables de pH, CE, temperatura y humedad previas se utilizará una base de datos capaz de almacenar dichos valores para después presentarle al usuario una tabla con cierta cantidad de lecturas.

Lenguaje empleado.

- **Recomendaciones:** Es necesario emplear el dialecto del usuario, de acuerdo con su formación, costumbre, hábitos y preferencias. Evitar uso de lenguaje extranjero, lenguaje técnico que pudiera tener connotaciones diferentes para el usuario. El diálogo debe referirse a conceptos entendidos por el usuario, más que a la implementación de la operación del sistema. La gramática por utilizar, la forma de expresión debe ser simple que no complique la interpretación por parte del usuario.

Propuesta:

Se hará uso de las palabras involucradas en sus actividades laborales diarias, que además identifica y sabe a lo que se refieren. Para la cuestión de información adicional se tratará de evitar palabras técnicas de lo que está ocurriendo con el sistema. Así mismo solo se usará el idioma español.

Convenciones y código visual

- **Recomendaciones:** Los indicadores visuales deben estar codificados por color, tamaño, ubicación o forma según corresponda. Debe planificarse el diseño general de las pantallas de un sistema debido a que una pantalla debe tener un marco en común, con zonas bien diferenciadas para los títulos, contenidos, información extra, entre otras cosas. La consistencia en el diseño visual de estos elementos reduce la posibilidad de errores de interpretación y facilita encontrar la información

Propuesta:

Para los indicadores visuales donde aparecerá algún dato se eligieron rectángulos de color blanco y contorno negro colocados a la derecha del icono abreviatura o palabra a la que están asociados. Para aquellos que se usaran como alarmas se proponen sean cuadrados y un poco más grandes que los anteriores para captar la atención del usuario. Se colocaron títulos en la parte superior de algunos bloques de información para su mejor comprensión.

Color

- **Recomendaciones:** El color debe usarse para ayudar a identificar varias claves por función o uso. Un color se puede utilizar para ayudar al usuario a identificar la información relevante. Se sugiere que no se escriba el texto en color; si es absolutamente necesario se debe colorear el fondo del texto, pero no el texto en sí. El rojo debe reservarse para funciones de emergencias. El número de colores utilizados para la codificación debe mantenerse al mínimo necesario para proporcionar suficiente información.
En caso de utilizar símbolos estos deben ir rellenos de color en lugar de tener delineados con colores.

Propuesta:

Los indicadores de los niveles de líquido pueden tener un valor de color verde que significa que el nivel del líquido es el adecuado y un color rojo el cual indica que este está

a punto de agotarse y es necesario rellenar el líquido para tener un correcto funcionamiento de las bombas.

El color de letra que se empleará será en su mayoría color negro.

Se utilizarán iconos o símbolos que estén rellenos de color para lograr una clara identificación de estos. Por otra parte, el botón de mediciones tendrá un color que no robe toda la atención de usuario, pero sí que tenga lo tenga presente.

Para diferenciar la sección de las variables de pH y CE se rellenará el fondo de la figura que los englobe.

Forma (Iconos o símbolos)

- Recomendaciones: Cuando la codificación secundaria es necesaria para apoyar la identificación de información específica se pueden emplear iconos o símbolos. Los íconos deben ser dibujos simples y análogos al objeto físico o la operación que representan.

Propuesta:

Por cuestiones de ahorro de espacio en la pantalla y con la finalidad de ofrecerle una representación más visual y clara al usuario se emplearán iconos o abreviaturas que identifiquen a las variables de temperatura, humedad, conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno principalmente.

Memoria

Al llevar a cabo tareas inmediatas lo operadores utilizan lo que se conoce como memoria de trabajo. Esta memoria es a corto plazo por lo que la capacidad de retener información de manera rápida y eficaz se ve involucrada.

- Recomendaciones: Evitar que el operador deba recordar más de cinco a nueve fragmentos de información y si es necesario repetir la información en otro lugar de la Interfaz. Por fragmento de información se refiere a los datos que tienen un sentido para el operador puede ser una palabra, un número, un código, etc que sean constantes durante el proceso que monitorea.

Propuesta:

Representar las variables de pH, CE, temperatura y humedad del ambiente con una abreviatura o un ícono para que asocie el valor correspondiente a este y le sea más sencillo recordar. Utilizar colores para indicar que esta correcto o no lo niveles de los líquidos, así solo debe recordar los de color rojo y proceder a corregirlos.

- Evaluar diseños contra requerimientos

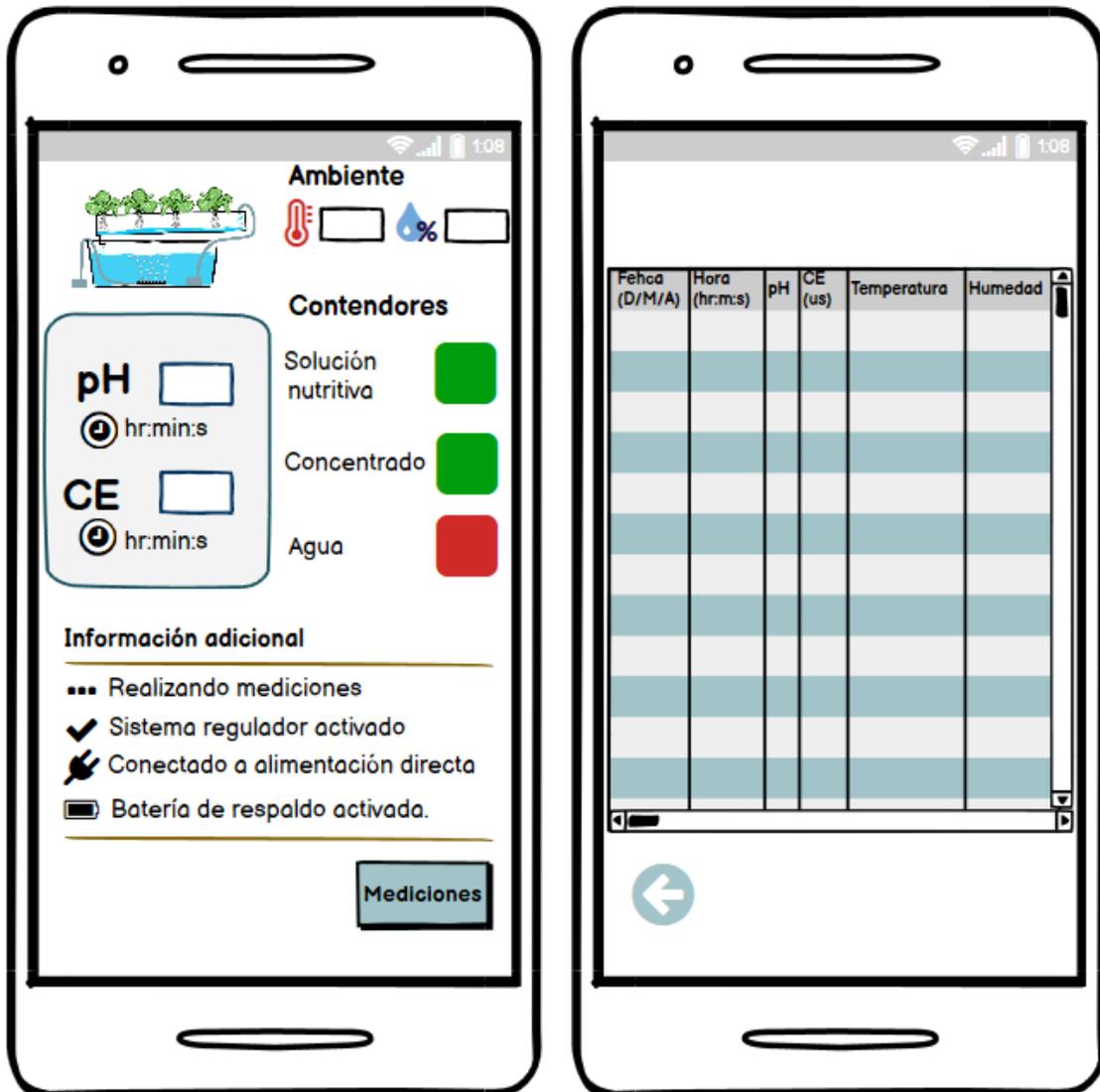


Figura 62 Propuesta de diseño de la Interfaz de usuario.

El diseño de la interfaz cubre los requerimientos del usuario previamente establecidos puesto que en ella se propone mostrar el estado del sistema, la temperatura y humedad del ambiente, así como el pH y CE de la solución nutritiva que circula para las plantas. A si mismo proporcionarle un indicador al usuario para saber si hay suficiente nivel de cada uno de los líquidos utilizados en el sistema regulador. En la cuestión de técnica sus componentes pueden ser desarrollados para ser mostrada como sitio web en un dispositivo móvil o una computadora,

2.3 Integración del sistema

2.3.1 Integración del Hardware

2.3.1.1 Módulo 1. Módulo de flujo de solución

En la Figura 63 se muestra el diagrama de la integración del módulo 1. Para la operación de dicho módulo se obtienen las señales de control (IN1 y IN2) mediante señales digitales que provienen del módulo de procesamiento (IO2 y IO4), mismas que tienen una referencia de tensión de 3.3 V, si la interfaz “Relay 2 SRD” recibe una señal de activación, el relevador asociado a la señal permitirá el flujo de energía en la bomba correspondiente.

Los colores empleados en los cables corresponden a: línea de fase, gris; neutro, azul, tensión de DC, rojo; e información, verde.

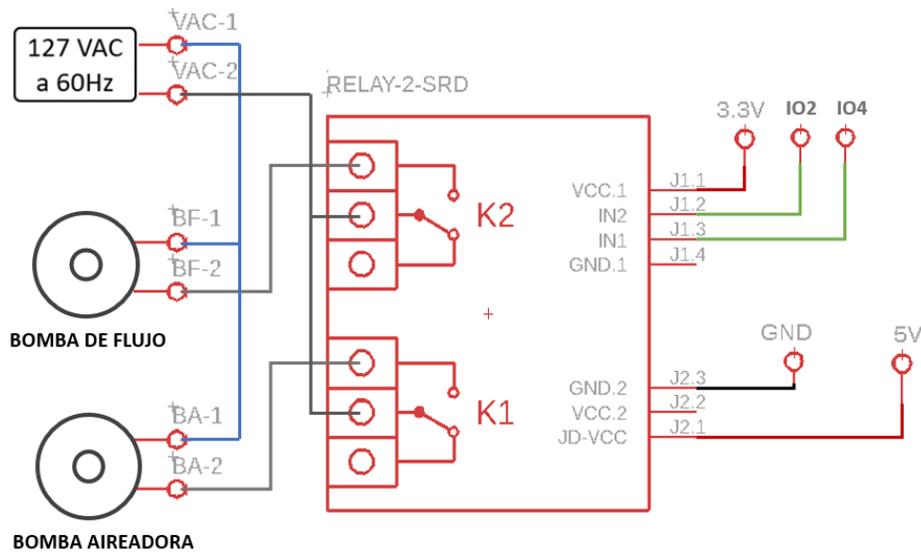


Figura 63 Integración del módulo 1

2.3.1.2 Módulo 2. Módulo de concentración de solución

En la Figura 64 se muestra el diagrama de la integración del módulo 2. Este módulo acondiciona las señales PWM de las terminales IO25 y IO26 del módulo de procesamiento a partir de las cuales activa y varía el caudal de las bombas que regulan la concentración en la mezcla de solución nutritiva.

Los colores de los cables corresponden a: tensión de DC, rojo y señales de información, verde.

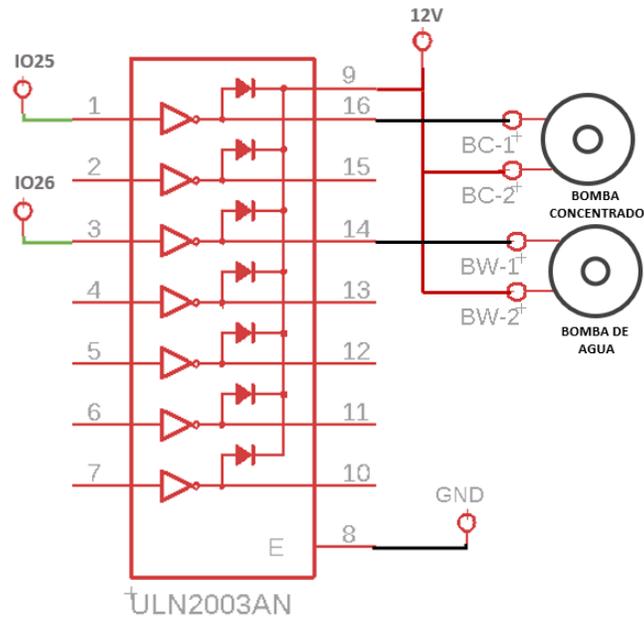


Figura 64 Integración del módulo 2

2.3.1.3 Integración de S1. Manejo de solución (M1 Y M2)

El sistema 1 lleva a cabo las acciones de control en los actuadores del sistema. El módulo M1 gobierna los actuadores encargados del flujo de solución en el sistema hidropónico y el módulo 2 controla el caudal de los actuadores encargados de regular los niveles de pH y CE en la solución nutritiva. La relación entre los módulos no es directa de modo que el sistema 1 es gobernado a partir de la información proporcionada mediante la comunicación interna del sistema como se puede observar en la Figura 65.

Los colores de los conectores en los diagramas corresponden a: línea de fase, gris; neutro, azul, tensión de DC, rojo; e información, verde.

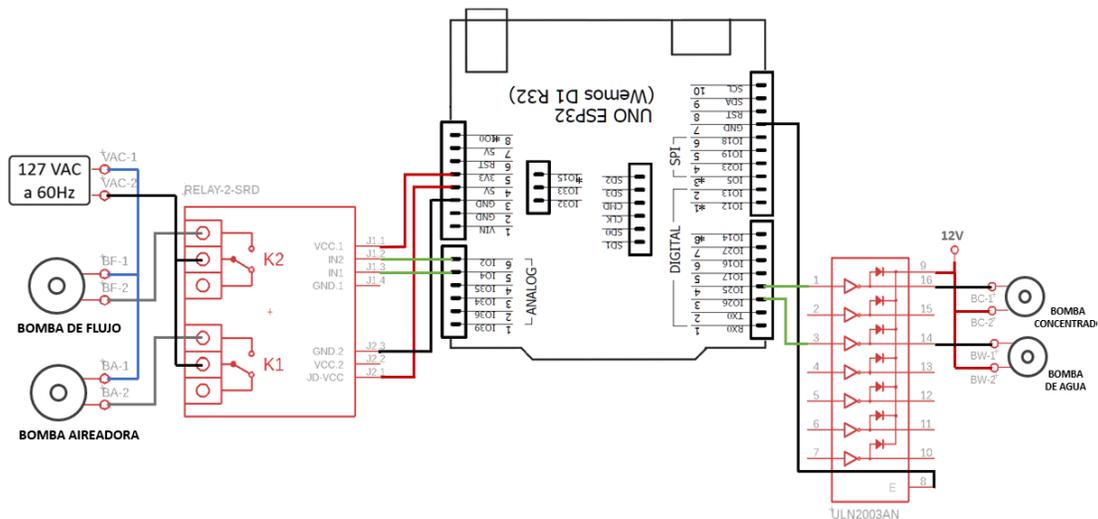


Figura 65 Integración del sistema 1

2.3.1.4 Integración de S2. Sistema energético

El sistema 2 proporciona energía al sistema 1 y al sistema 3 como se muestra en el diagrama de la Figura 66. Para realizar el acondicionamiento y distribución se seleccionó una fuente de alimentación de 12 V y se hizo uso de los reguladores de tensión MP1482DS para 5V y el AMS1117 para 3.3 V estos dos últimos integrados en la tarjeta de desarrollo. Adicionalmente se propone el uso de un circuito de alimentación de respaldo al módulo de procesamiento para evitar pérdida de datos.

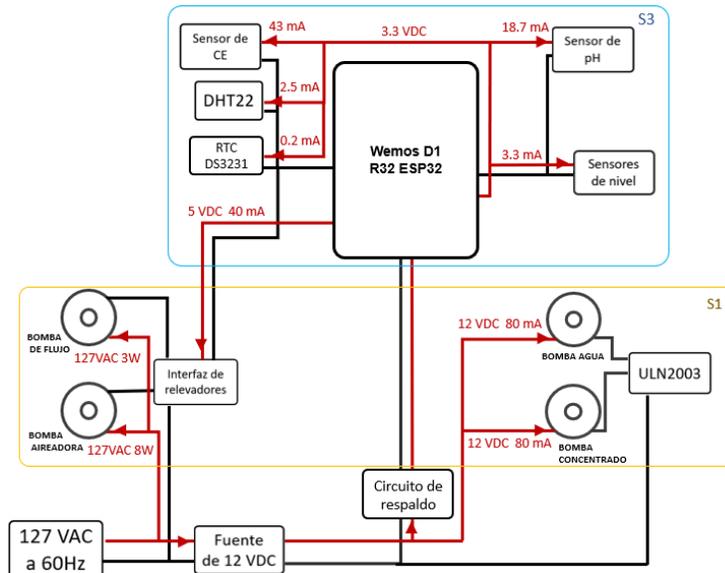


Figura 66 Integración del sistema 2

2.3.1.5 Integración de S3. Sistema de información (M3, M4 y M5)

El sistema 3 se encarga del manejo de todos los datos, la representación de esta integración se muestra en la Figura 67.

Los datos externos provienen del módulo de medición (M3) que obtiene todos los parámetros de interés mediante el sensor de pH, de CE, el interruptor de nivel, un dispositivo RTC para una referencia de tiempo y el sensor de temperatura y humedad, mismos que son interpretados por el módulo de procesamiento (M4) representado por la tarjeta de desarrollo UNO ESP32 encargado de tomar las decisiones de control para posteriormente ser traducidas en señales entendibles para el sistema de manejo de solución (S1) y por la interfaz (M6). Estas señales de comunicación se representan en la figura como las conexiones a BA, BF, conectadas a las entradas de control que recibe el módulo 1 para la bomba de aire y bomba de flujo, así como BC y BW respectivamente para el módulo 2 para la bomba de concentrado y bomba de agua.

Finalmente, el módulo de comunicación (M5) se representa mediante un recuadro dentro del dispositivo de procesamiento pues la comunicación externa (con la interfaz) se realiza

de manera inalámbrica mientras que la comunicación interna está representada por las conexiones en color verde (con S1).

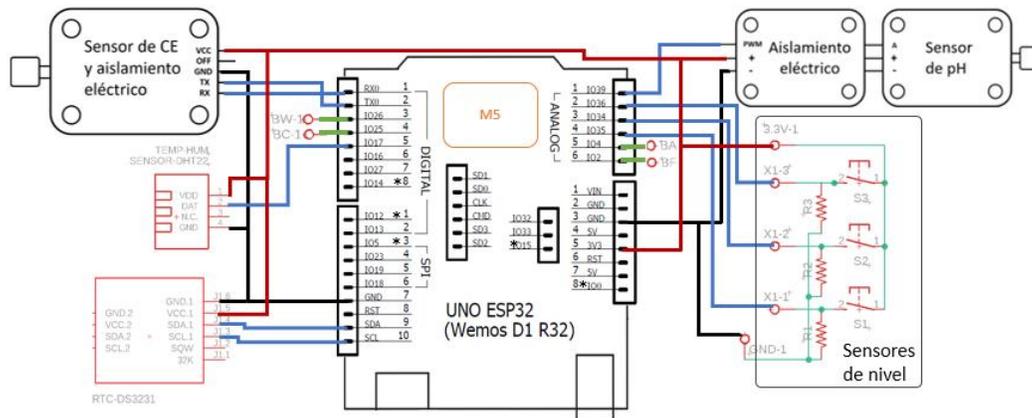


Figura 67 Integración del sistema 3

2.3.1.6 Integración de S4. Sistema estructural (S1, S2 y S3)

En la Figura 68 se muestra un diagrama del sistema estructural, mismo que se puede entender como el ensamble general de los módulos y subsistemas. La interfaz (M6) es el único módulo que no forma parte del sistema estructural ya que al estar diseñada para mostrar al usuario parámetros del sistema en un dispositivo externo, no estar contenido físicamente dentro del sistema.

En el diagrama, el recuadro azul señala la sección que representa la integración del sistema de información (S3), Los recuadros amarillos señalan la posición de los módulos del sistema de manejo de solución (S1) en la integración global y el recuadro morado señala a los elementos principales del sistema energético (S2) aunque este interactúa con todos los componentes como se mostró en la sección de integración de este sistema.

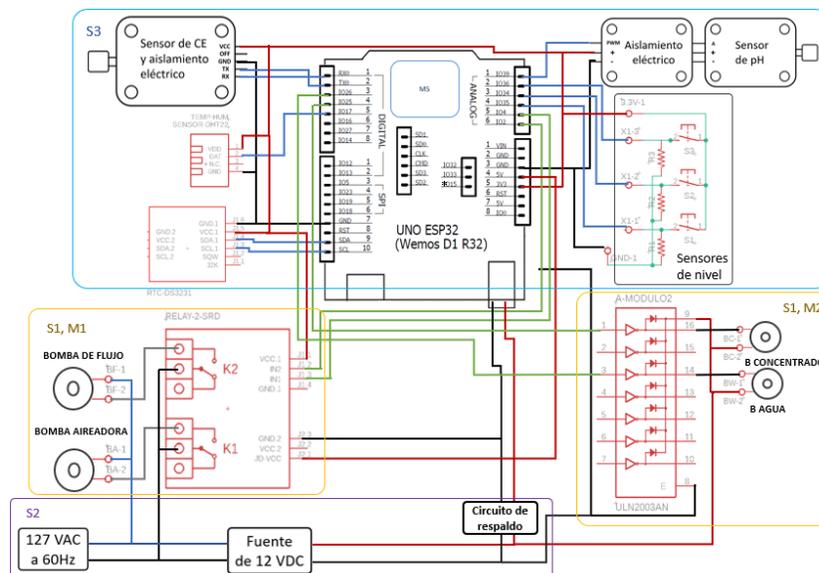


Figura 68 Diagrama de integración de todo el sistema

Validación estática

Una vez que se realizó el ensamble de la mayoría de los componentes en un solo modelo, se realizaron algunas modificaciones en algunos componentes. Por ello se volvieron a revisar los procesos disponibles, para las tapas de los contenedores, la pared lateral de estos mismos y los tubos de PVC que soportan la carcasa y el sensor de humedad y temperatura se obtuvieron los siguientes procesos:

Forma:

De acuerdo con los procesos disponibles para las distintas adecuaciones, el proceso sería de maquinado, específicamente actividades de barrenado para la creación de barrenos para tornillos y mangueras.

Unión:

Para el ensamblaje de la carcasa con los tubos de PVC y del sensor con el tapón de PVC es con tornillería.

Acabado:

Dadas las características de los componentes no es necesario un acabado pues las superficies siguen estando lisas y por el tipo de aplicación no requieren ningún tratamiento especial.

Para la integración de los sensores de pH y CE se integró una pieza que ayude a sujetarlos y mantenerlos en una posición vertical, la cual se puede observar en la Figura 69, este soporte tiene la geometría para colgarse del borde de la caja (Figura 69b) y dos círculos (Figura 69a) casi completos para sostener las sondas con la altura adecuada para sumergir las sondas casi hasta el fondo del contenedor. Esto para evitar que, aunque la solución nutritiva casi se termine las sondas sigan estando sumergidas ya que ninguna de las dos debe de secarse por completo.

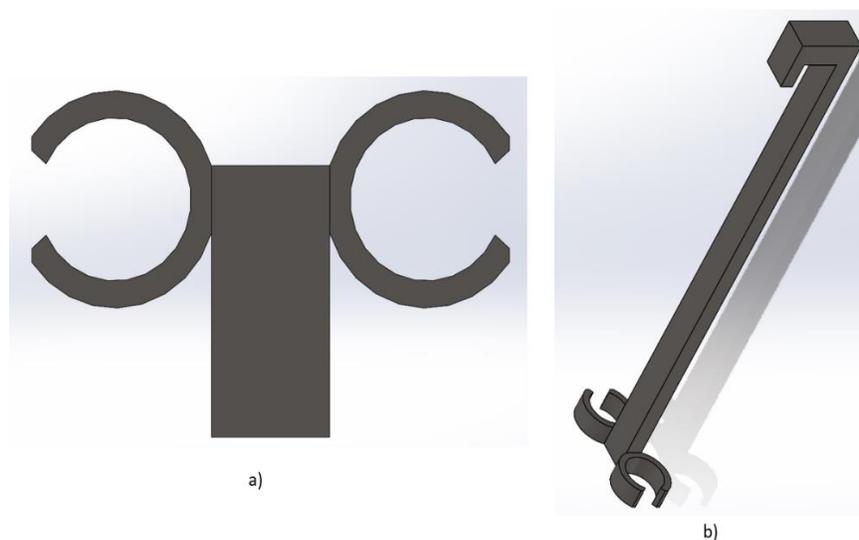


Figura 69 Soporte para las sondas de pH y CE, a) vista superior, b) vista isométrica

Para esta pieza se realizó un análisis de elemento finito con el objetivo de corroborar que este no se pandee o se rompa. Cabe señalar que se realizó basado en un diseño que brinda el fabricante [62] con la modificación de la extensión para adaptarla al contenedor de la solución nutritiva. Este análisis se encuentra en el apéndice B.6.

Esta pieza se va a manufacturar en material de policarbonato o ácido poliláctico (PLA) ya que el fabricante recomienda la impresión en 3D para esta pieza. El plano de manufactura se puede consultar en el anexo E. Planos de manufactura.

Ensamble del sistema

La integración de la estructura hidropónica junto con los diversos componentes físicos a utilizar se muestra en la Figura 70 y Figura 74. Este ensamble, así como el diseño de cada componente fue realizado en Solidworks 2020 edición estudiantil. En la Figura 70 se aprecia la estructura hidropónica, junto con los 3 contenedores que se seleccionaron con anterioridad desde una perspectiva isométrica, el contenedor de color azul con tapa blanca es el contenedor para la solución nutritiva, el gris fuerte para el agua y el gris claro para el concentrado de nutrientes. En la parte superior se encuentra el sensor de humedad dentro de una carcasa para su protección, la cual se aprecia en la Figura 71. El sensor se optó por colocarlo en la parte superior sobre uno de los tapones de los tubos de PVC y sujetarse mediante un tornillo con tuerca. En la Figura 70 también se observa que arriba del contenedor para el agua y del contenedor para el concentrado de nutrientes están las bombas peristálticas con su respectivo orificio para las mangueras. Estas dos bombas se deberán de atornillar a la tapa ya que no son sumergibles. Por otro lado, el contenedor para la solución nutritiva tiene diversos orificios, (Figura 72); el 1 y 4 señalados en la figura son para la otra manguera de las bombas peristálticas respectivamente, el 2 para la manguera de la bomba de aire; el 3 para las mangueras que realizan la alimentación y retroalimentación de la solución nutritiva que circula por la estructura hidropónica. Por último, el 5 es para la colocación del soporte para las sondas de medición del pH y CE y también los cables de éstas mismas. El soporte para las sondas se puede apreciar en la Figura 73 donde se aprecian ambas sondas y la parte gris sería el soporte. Este soporte es colocado en una de las paredes del contenedor, alejado de las mangueras de agua y concentrado de nutrientes con el fin de evitar cambios bruscos en la medición si alguna de estas sustancias entra en contacto con las sondas, ya que las mediciones tienen que ser de la solución nutritiva.

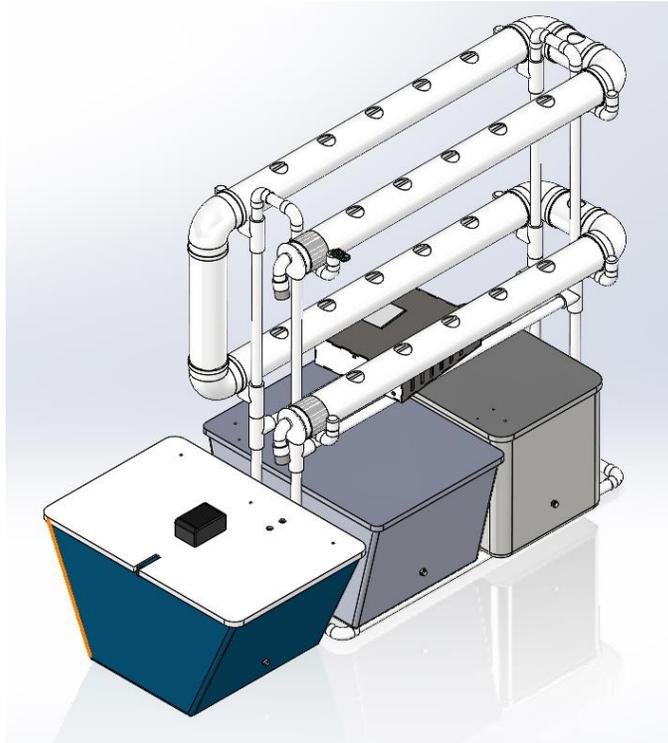


Figura 70 Vista isométrica del sistema



Figura 71 Acercamiento al sensor de humedad y temperatura dentro de una carcasa

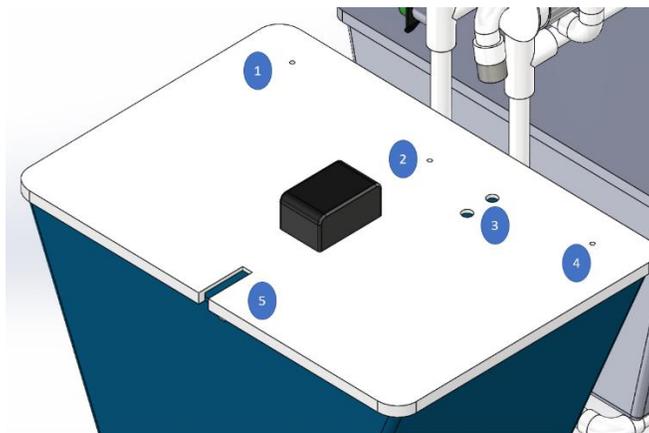


Figura 72 Acercamiento de la Figura 70 hacia la tapa del contenedor de la solución nutritiva

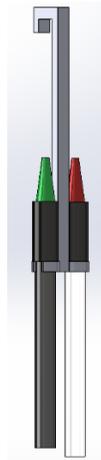


Figura 73 Soporte para las sondas de pH y CE con dichas sondas

Tanto en la Figura 70 y Figura 74 se aprecian en los laterales de los contenedores un punto blanco los cuales son los sensores de nivel, los cuales se colocaron a una altura de 7cm con respecto a la base de cada contenedor ya que cuando haya una menor cantidad de sustancia por debajo del sensor en cada contenedor se evite que ya no se pueda realizar un ciclo más de trabajo y que las bombas no trabajen sin líquido. De igual forma, en la Figura 74 se aprecia la vista lateral de la carcasa donde irán la mayoría de los componentes electrónicos (excepto los sensores y bombas). La carcasa irá fija a los tubos horizontales de unión de la estructura hidropónica, estos se perforarán para poder tener los barrenos para fijar con tornillos y tuercas esta carcasa.

La distribución de la bomba principal, los sensores de pH y CE, así como los de nivel se pueden apreciar en la Figura 75, donde se cambió la transparencia del material de los contenedores para dar mayor detalle de esta distribución.

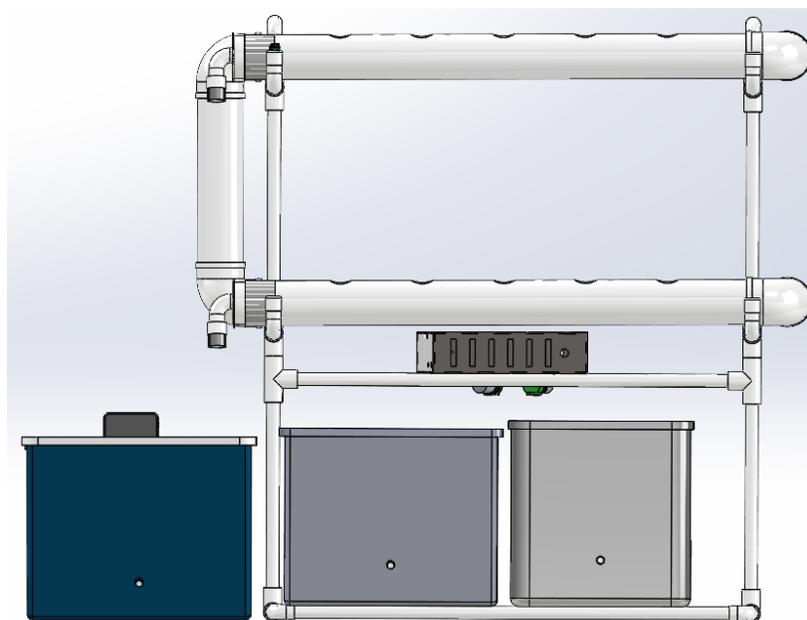


Figura 74 Vista lateral del sistema

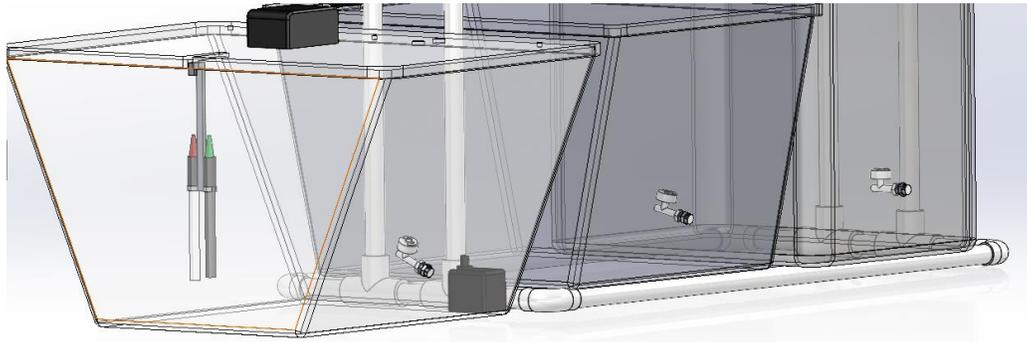


Figura 75 Distribución de los componentes dentro de los contenedores

Para la carcasa que contendrá la mayoría de los componentes electrónicos se realizó una carcasa de acrílico, la cual se muestra en la Figura 76. Se optó por un diseño de una caja armable la cual se manufacturará con corte láser debido a los diseños tipo rompecabezas y la precisión que se requiere para que cada pieza encaje en su lugar; además de los detalles de la ventilación y los barrenos (parte inferior). Como se mencionó en Selección de procesos se usará pegamento para acrílico para la unión entre las piezas laterales y estas con la base dejando la tapa superior libre para poder abrir la carcasa en caso de ser necesario. Y para unir la carcasa a la estructura hidropónica se utilizarán tornillos. Los planos de cada pieza con sus respectivas variantes se presentan en el anexo E. Planos de manufactura.

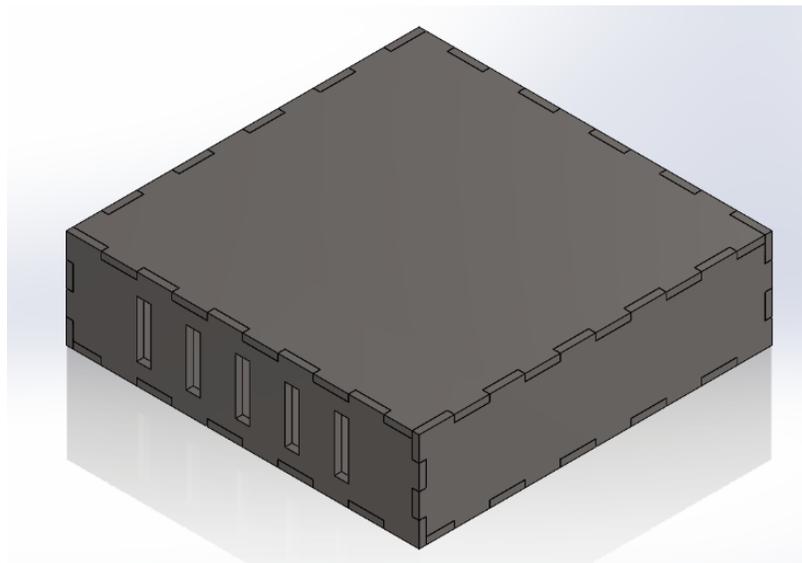


Figura 76 Carcasa para los componentes electrónicos

En la Figura 77 se presenta una propuesta de distribución de los componentes electrónicos dentro de la carcasa esto con el fin de verificar que el tamaño de la base de la carcasa es suficiente para que estén todos los componentes. Debido a que esta distribución podría cambiar, los barrenos para fijar cada componente, así como los orificios para los cables que se conectan a algún componente en el exterior no son presentados en este modelo.

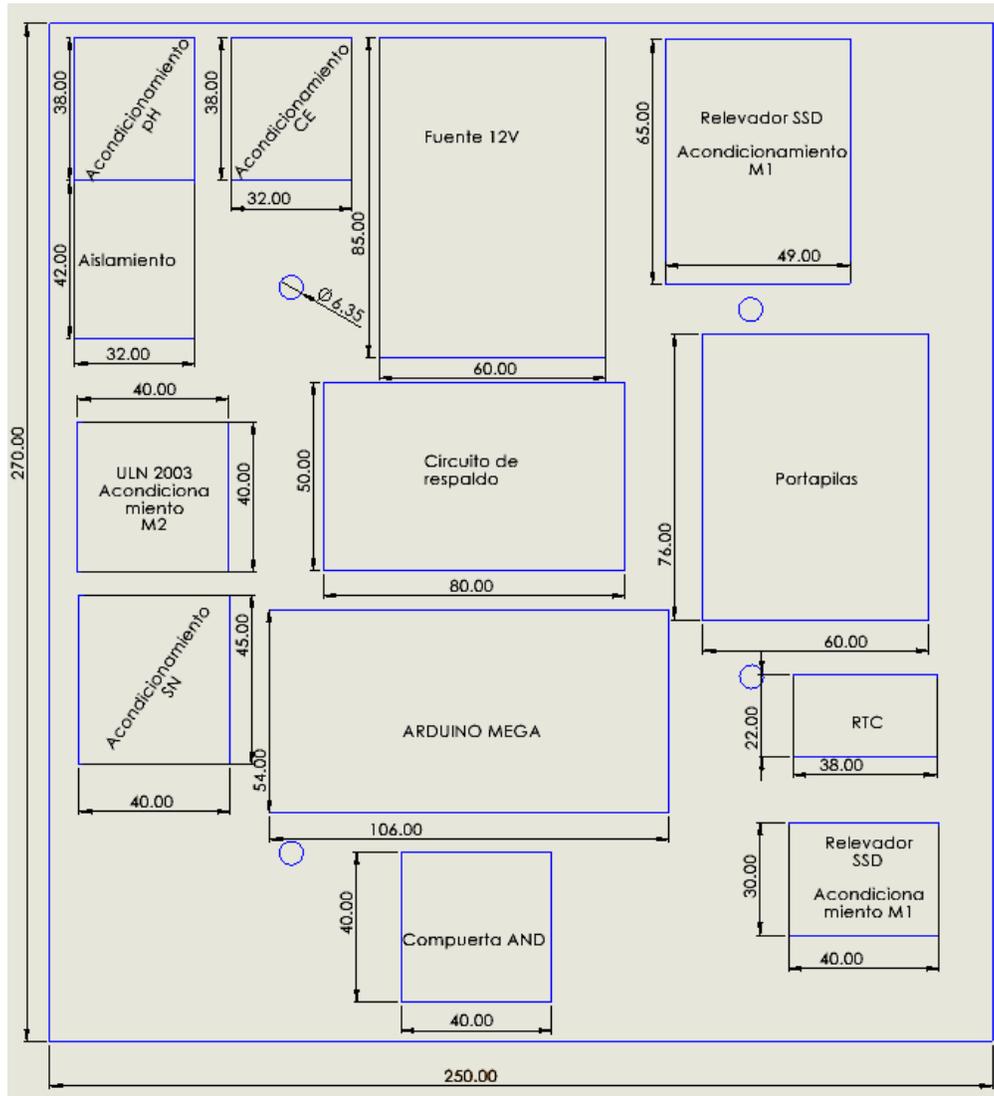


Figura 77 Distribución de los componentes electrónicos en la carcasa

Para incorporar el sensor de humedad y temperatura se realizó una carcasa que lo proteja y con la cual se pueda fijar dicho sensor a la estructura hidropónica, por lo que la carcasa se divide en dos partes como se muestra en la Figura 78 con un verde más fuerte se representa la base de esta carcasa y con un verde más claro la parte que contiene como tal al sensor. Esta carcasa será impresa en 3D a partir de los planos que se encuentran en el anexo E. Planos de manufactura.

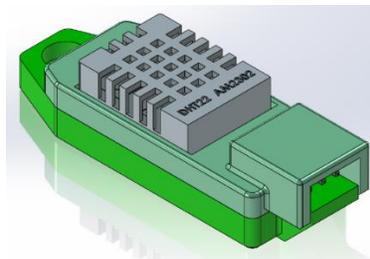


Figura 78 Sensor DHT22 con carcasa

2.3.2 Integración del Software

2.3.2.1 Pseudocódigo

Se realizaron diversos pseudocódigos para expresar los distintos pasos que va a realizar el sistema, cada uno representa por pasos la solución al problema descrito con anterioridad. Al realizar los pseudocódigos se buscó que fueran de la forma más parecida a un lenguaje de programación, cabe resaltar que los pseudocódigos no tienen un estándar y pueden ser flexibles en su escritura.

El primer pseudocódigo realizado es el de la rutina principal, éste nos da los pasos en general que hará el microcontrolador, incluyendo algunas otras rutinas como el control difuso y otras externas realizadas por el reloj externo y la comunicación con el servidor web.

Pseudocódigo para la rutina principal:

1. Proceso Principal
2. Declaración de variables
3. Inicializar variables, puerto serial 2, y conexión con la IP
4. Loop
 1. Función Sistema de respaldo
 1. Si pinLuz==LOW
 1. Haz Proceso Conexión_servidor_web
 2. Envía que se fue la luz
 2. Si no
 1. Haz Proceso Conexión_servidor_web
 2. Envía que regresó la luz
 2. Si la hora actual está entre 8am y 8pm
 1. Si se apretaron los dos botones de la caja
 1. Definir semanas
 2. SetPoint = 1400
 3. Bandera = 1
 4. Enviar a la interfaz que se inició el ciclo de las lechugas
 2. Si ocurrió la interrupción del sensor de la solución nutritiva
 1. Si valor del sensor == 0

1. Enviar a la interfaz que se acabó la solución nutritiva
2. Si valor del sensor == 1
 1. Enviar a la interfaz que se rellenó la solución nutritiva
3. Si ocurrió la interrupción del sensor de agua
 1. Si valor del sensor == 0
 1. Enviar a la interfaz que se acabó el agua
 2. Si valor del sensor == 1
 1. Enviar a la interfaz que se rellenó el agua
4. Si ocurrió la interrupción del sensor de concentrado de nutrientes
 1. Si valor del sensor == 0
 1. Enviar a la interfaz que se acabó el concentrado
 2. Si valor del sensor == 1
 1. Enviar a la interfaz que se rellenó el concentrado
5. Si Bandera == 1
 1. Proceso Reloj externo
 1. Tiempo Reloj externo cada 2 horas activa bomba principal si la rutina de control no está activa y apaga bomba principal después de 30 minutos. Activa bomba de aire después de haber apagado la bomba principal
 2. 1 minuto después de encender la bomba de aire leer pH y CE
 3. Haz Proceso Conexión_servidor_web
 1. Envía Valores de los sensores
 4. Proceso de Control difuso durante una hora y 30 minutos
 5. Después del control se reinicia el sub-ciclo de control y comienza de nuevo la bomba de solución nutritiva
 2. Si tiempo actual <= Semana 3
 1. Definir SetPointCE=1400
 3. Si no tiempo actual > Semana 3 && <semana5
 1. Definir SetPointCE=1600
 4. Si no

1. Definir SetPointCE=1700

5. $errorCE = setPointCE - CE$

5. Fin

El segundo pseudocódigo presentado es la rutina del control difuso, esta rutina consiste en ingresar los valores de pH y del error de conductividad al control difuso. Con estos valores se busca obtener los valores de salida para cada PWM para las bombas de agua y concentrado de nutrientes.

Pseudocódigo de la rutina del control difuso:

1. Proceso Control_difuso
2. Variables de entrada pH y $errorCE = setPointCE - CE$
3. Los valores se evalúan en las reglas difusas
 1. SalidaPWMAgua = Salida del control difuso 1
 2. SalidaPWMNutrientes = Salida del control difuso 2
 3. Activar bomba de aire
 4. Leer pH y CE
4. Fin

El tercer pseudocódigo presentado es la rutina para la conexión de internet entre el microcontrolador con el servidor web. En este pseudocódigo se redactan los pasos que realiza el microcontrolador para conectarse a internet específicamente con el servidor web deseado.

Pseudocódigo de la rutina para la conexión del microcontrolador con el servidor web:

Pseudocódigo:

1. Proceso Conexión_servidor_web
2. Definir ssid y contraseña del módem Wifi
3. Valores de sensores leídos
4. URL
5. Inicio
6. Mientras estado_Conexión \neq correcto manda un mensaje de error, hasta que estado_Conexión==correcto
7. Se realiza la solicitud HTTP al servidor web de la URL
8. Mientras la respuestaHTTP \neq correcto
 1. Manda mensaje "Error 404"

9. Hasta que respuestaHTTP!= correcto
10. Servidor web realiza conexión con la BD
11. Enviar al servidor web valores de los sensores leídos y fecha con hora
12. Se termina la conexión Wifi
13. Fin

Para facilitar la programación, se optó por realizar diagramas de flujo con el fin de comprender y explicar el funcionamiento del sistema. Los diagramas de flujo se realizaron de acuerdo con el estándar ANSI/ISO 5807-1985 [63]. Debido a que son diagramas de flujo de programas, se utilizaron los símbolos de procesamiento, los cuales definen la ruta que seguirá el programa tomando en cuenta condiciones lógicas; en conjunto se utilizaron líneas de flujo las cuales indican el flujo de control de las operaciones y también se usaron símbolos especiales para facilitar la lectura y escritura del diagrama de flujo. Estos diagramas de flujo se encuentran en el apéndice B.7.

2.3.2.2 Validación de control (simulación)

Para realizar la validación del control, se hizo otra simulación similar a la presentada en la sección Diseño del algoritmo de procesamiento o controlador con la diferencia de ahora usar los valores del controlador difuso de salida obtenidos. Estos resultaron en 2 arreglos de 4095x6000 valores, uno para cada bomba peristáltica. Para obtener estos arreglos, es necesario pasar por todos los valores posibles de cada variable de entrada, esto se realizó con el diagrama de bloques presentado en la Figura 79, donde por medio de 2 ciclos “for” y pasando cada uno con un contador que incrementa en uno (variable i) se obtienen todos los valores posibles de las variables de entrada. Los valores de salida del bloque “FL Fuzzy Controller.vi” se convirtieron a enteros de 32 bits debido a que el microcontrolador dará valores enteros a los pines PWM donde se conecten las bombas en lugar de valores flotantes. A la salida de ambos ciclos se aprecia lo que serían dos indicadores de arreglo, los cuales son los que almacenan los valores de salida del control difuso.

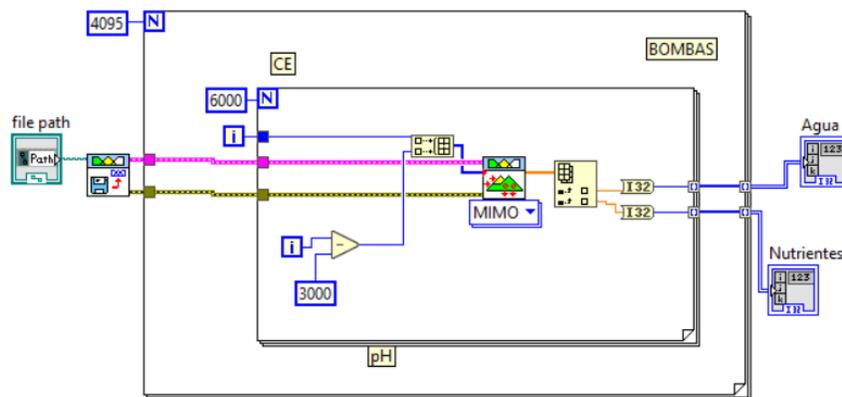


Figura 79 Diagrama de bloques para la obtención de los arreglos de los valores de salida del control difuso

Ya que se generaron los arreglos de cada variable de salida, se crearon los arreglos en forma de constantes de cada variable de salida; estos arreglos constantes se pueden observar en la Figura 80. Para obtener el valor requerido de cada bomba para realizar el ajuste o control de la solución nutritiva es necesario acceder a la posición del valor del sensor de pH (valor de la fila), la cual puede variar entre 0 y 4095 y en la columna del valor del error de CE, el cual va de -3000 a 3000 pero debido a que no puede ser negativa la posición en un arreglo a dicho error se le suma 3000 para tener la posición de la columna deseada. Esto es para ambas bombas. Al igual que se realizó en el diagrama de bloques de la Figura 54, el valor del PWM de cada bomba es retroalimentado con el “Shift register” para que se actualice cada que el valor de los sensores cambia.

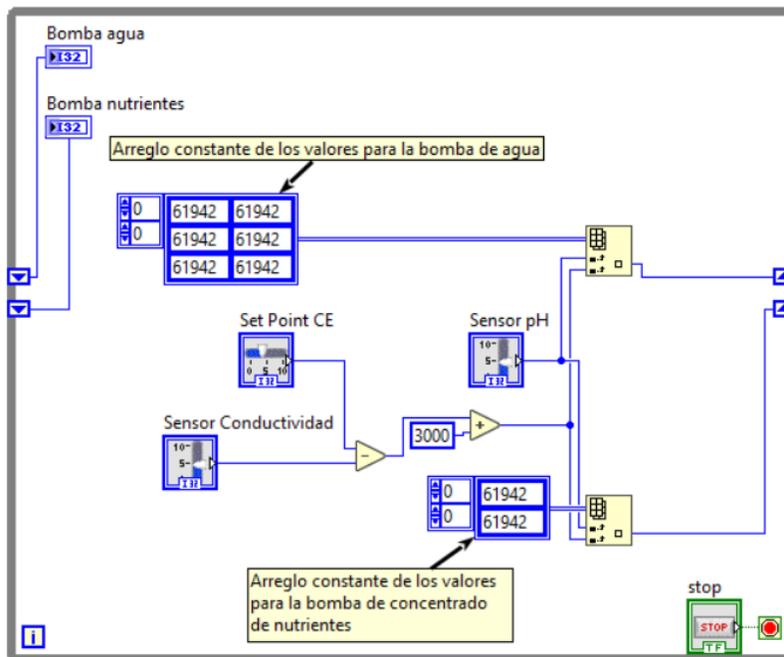


Figura 80 Diagrama de bloques de la simulación de control por medio de arreglos

En la Figura 81 se muestra la simulación en caso de tener una sustancia muy ácida y conductiva, como respuesta se activaría la bomba de agua casi en su máximo, mientras que la bomba de nutrientes se mantiene apagada. En la Figura 82 se muestra la simulación en caso de tener una sustancia muy básica y poco conductiva, como respuesta se activaría la bomba del concentrado de nutrientes casi en su máximo, mientras que la bomba de agua se mantiene apagada. Estos resultados son congruentes con los esperados, que se active la bomba de agua cuando una sustancia está más ácida y con mayor conductividad de lo deseado y que se active la bomba de nutrientes cuando sea más básica y con menor conductividad de la deseada.

Esta simulación se realizó por medio de arreglos, con el fin de tener una forma con la cual el microcontrolador pudiera leer los valores del control difuso para evitar hacer todo el algoritmo del control difuso en la misma programación del microcontrolador, aunque esta posibilidad no se ha descartado.

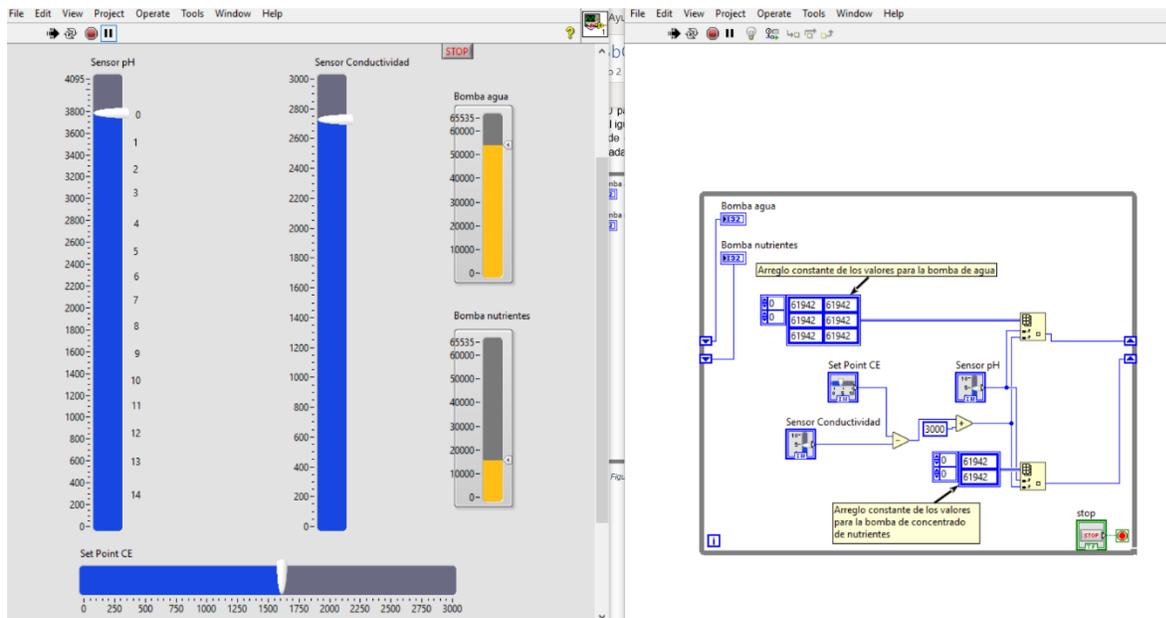


Figura 81 Representación de la simulación con valores en los sensores de una sustancia muy ácida y conductiva, junto con el diagrama de bloques utilizado

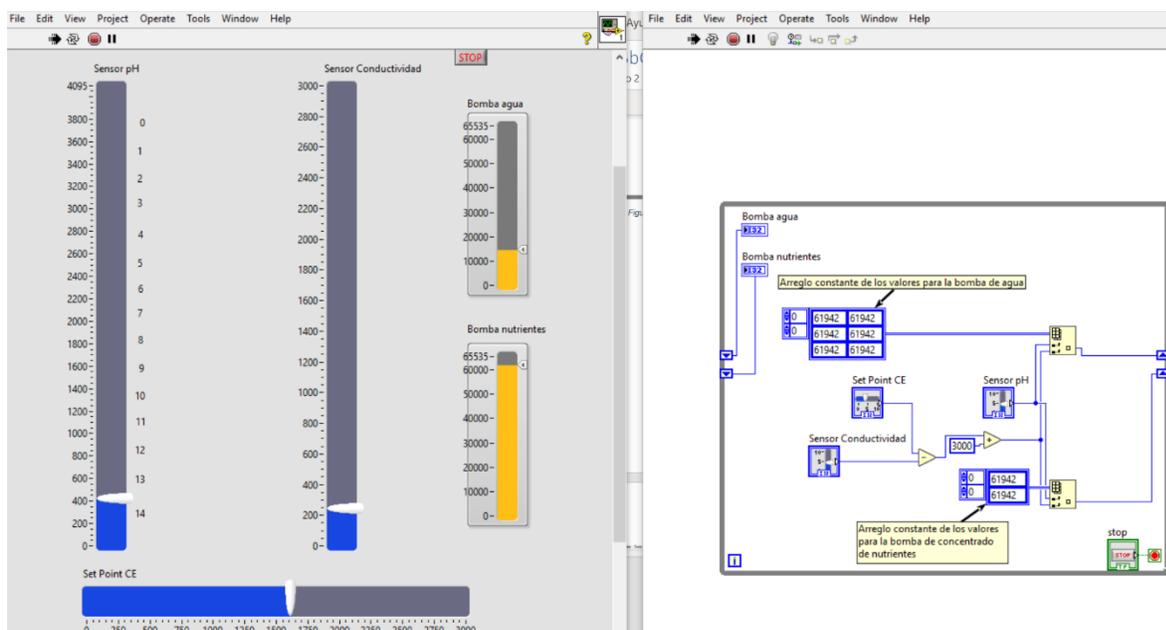


Figura 82 Representación de la simulación con valores en los sensores de una sustancia muy básica y poco conductiva, junto con el diagrama de bloques utilizado

Capítulo 3. Implementación del sistema

3.1 (S4) Sistema estructural

3.1.1 Sistema hidropónico

La integración de la estructura hidropónica se llevó a cabo tal como se planteó en la etapa de diseño (Capítulo 2, sección 2.2.1.1). El diseño contempla una estructura hidropónica de PVC en diseño de cama de dos niveles que debe poder ser colocada en un espacio de 1.20 m. x 1.50 m. características a partir de las cuales se eligió el modelo comercial DEUX PLUS de la empresa Veggitso.

El resultado de la integración consiste en, como se muestra en la Figura 83, el ensamble de las subestructuras principales (la estructura de soporte y los canales de cultivo). Específicamente en la Figura 83 (a) se puede observar la trayectoria completa de los canales de cultivo mientras que en la Figura 83 (b) se puede observar el perfil de los postes tubulares de la estructura de soporte.



Figura 83 Estructura del sistema hidropónico

Validación

Una vez ensamblada la estructura hidropónica completa se comprobaron sus dimensiones finales y se compararon en la Tabla 67 con las dimensiones planteadas en la sección de requerimientos (Capítulo 2 sección 2.1.1) mostrando así que se cumplió con los requerimientos de diseño.

Tabla 67 Verificación de dimensiones de la estructura

Estructura hidropónica			
Requerimiento		Límites	Dimensiones de Implementación
R1.1	Largo	≤ 1.5 m	1.1 m
R1.2	Ancho	≤ 1 m	0.45 m
R1.3	Altura	≤ 1.5 m	1.1 m
R3	lechugas por cosecha	> 15 unidades	22 unidades

Esta estructura cumple con la función F7 “Soporte y protección del sistema” de la arquitectura funcional (Capítulo 2 sección 2.1.2) ofreciendo soporte al producto (las lechugas) y a los elementos electrónicos del resto del sistema de control como se muestra en la Figura 84.



Figura 84 Vista de la estructura de soporte con todos los elementos del sistema.

Vale la pena mencionar que se mantuvo la capacidad de cultivo de 22 lechugas en la estructura, (propuesta en diseño) pues, corresponde al 10% de capacidad de cultivo del Sr Juan Martínez, cumpliendo de ese modo con la construcción de un sistema hidropónico a escala como se plantea en el primero objetivo específico.

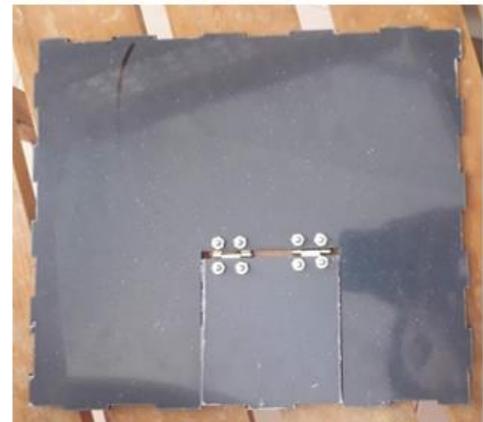
3.1.2 Caja de protección de componentes

La integración de la cubierta de los componentes electrónicos se llevó a cabo de la manera propuesta en el diseño (Capítulo 2, sección 2.2.1.2). Es decir, fue fabricada en acrílico mediante corte láser como proceso de maquinado y uniones mediante pegamento para acrílico sin algún proceso extra de acabado.

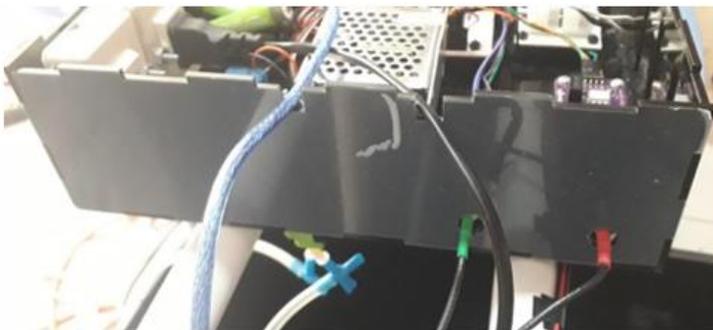
El resultado final de esta integración se muestra en la Figura 85 donde se puede observar la caja desde 2 perspectivas, así como la cubierta superior, cuyos planos pueden encontrarse en la sección de Anexos.



a) Lateral de la caja de componentes



b) Tapa superior de la caja de componentes



c) Frente de la caja de componentes

Figura 85 Carcasa de componentes electrónicos

Validación

En la Tabla 68 se muestran las dimensiones planteadas en la sección de requerimientos (Capítulo 2 sección 2.1.1) junto con las dimensiones medidas una vez realizada la integración de esta estructura comprobando que los resultados cumplen con dichos requerimientos.

Tabla 68 Validación de requerimientos de la cubierta

Caja de componentes			
Requerimiento		Límites	Dimensiones de Implementación
R4.1	Largo	<= 150 cm	30 cm
R4.2	Ancho	<= 100 cm	25 cm
R4.3	Altura	<= 150 cm	7.6 cm
R5	Diseñado para colocarse y removerse	Sujeción mediante tornillos	Tornillos de ¼ de pulgada

La función de la cubierta en el prototipo es la F7 “Soporte y protección del sistema” de la arquitectura funcional (Capítulo 2 sección 2.1.2) ofreciendo protección del ambiente y de agentes externos, así como soporte a los elementos electrónicos y de procesamiento del sistema.

3.2 (S1) Sistema de manejo de solución

3.2.1 Implementación del módulo de flujo de solución (M1)

La implementación del módulo de flujo de solución consiste en la colocación y control encendido/apagado de una bomba de agua sumergible en el contenedor principal y de una bomba de oxigenación en la parte superior a fin de garantizar flujo de nutrientes con la adecuada oxigenación a todo el sistema hidropónico.

Validación del módulo 1

En la Tabla 69 se muestran las restricciones planteadas en el Capítulo 2 sección 2.2.2.2 en la columna de “diseño” con las características obtenidas una vez realizada la integración del módulo en la columna de “implementación”.

Tabla 69 Validación de requerimientos del actuador de flujo de solución

Requerimiento		Diseño	Implementación
R11	Caudal de la bomba de flujo	Mínimo 600L/hr	1200L/hr

-	Altura de alcance mínimo de la bomba de flujo	$\geq 1.1 \text{ m}$	2 m
---	---	----------------------	-----

Prueba 1. Compatibilidad del módulo 1 (bomba de flujo y la bomba aireadora) con el sistema de información (S3), el sistema energético (S2) y el sistema estructural (S4).

Objetivo: Verificar la compatibilidad del módulo con el resto del sistema.

Descripción: Se conectó la bomba de flujo y la bomba aireadora con su etapa de potencia al sistema de control en la tarjeta de desarrollo en sus respectivas posiciones finales dentro del sistema estructural y se realizó una prueba equivalente a un ciclo completo de funcionamiento reduciendo el tiempo de operación de 30 minutos a un minuto.

Resultados:

Se comprobó la compatibilidad de la bomba de flujo y la bomba aireadora con el resto del sistema. En la Figura 86 (a) se puede observar que, respecto al sistema estructural, la bomba sumergible fue capaz de mantener un flujo laminar a través de todos los canales de cultivo. Una vez apagada la bomba, se mantiene en los canales aproximadamente 2 cm de altura de solución nutritiva (cumpliendo con las pautas de la técnica NFT) Figura 86 (b). Finalmente, el control de encendido/apagado de ambos actuadores se realizó correctamente mediante el sistema de información y el sistema energético cuyos elementos se muestran en la Figura 86 (c).



(a) Flujo en un canal de cultivo con la bomba principal encendida



(b) Solución nutritiva acumulada en el canal de cultivo



(c) Implementación del módulo 1 en el sistema estructural mediante el sistema 2 y 3

Figura 86 Prueba de compatibilidad del módulo 1 con el resto del sistema

3.2.2 Implementación del módulo de concentrado de solución (M2)

Contenedores de soluciones

Para la implementación del módulo de concentrado de soluciones se respetó la disposición de los contenedores y los modelos generales de los contenedores propuestos en la etapa de diseño (Capítulo 2, sección 2.2.2.1), es decir con una capacidad de aproximadamente 60 litros para el contenedor de solución nutritiva, 40 litros para el contenedor de agua y 20 litros para el contenedor de concentrado de nutrientes, la implementación de todo lo antes dicho se muestra en la Figura 87.



Figura 87 Contenedores de sustancias

Actuadores

Los actuadores del módulo 2 consisten en bombas peristálticas que generan un flujo de líquido al contenedor principal, para realizar el control de pH y CE.

La implementación de este módulo se llevó a cabo con los actuadores propuestos en la etapa de diseño (Capítulo 2 sección 2.2.2.2) con el único ajuste en su posición, ahora fijas mediante tornillos a la parte inferior de la caja de componentes electrónicos en lugar de en las tapas de los contenedores secundarios a fin de simplificar para el usuario el proceso de rellenado de estos al no tener que cambiar la posición de los actuadores para ello.

Verificación del módulo 2

Prueba 1. Caracterización de las bombas peristáltica con su etapa de potencia.

Objetivo: Verificar la compatibilidad del circuito de potencia (ULN2003) con las bombas peristáltica propuestas y determinar la tensión de arranque del componente, así como su consumo particular de corriente.

Descripción: Se conectó a la entrada del circuito de potencia una señal PWM de 5V tomando mediciones al variando el ciclo de trabajo de 0% a 100% o de 0 a 255 bits.

Resultados: Como se puede observar en la Figura 88 y Figura 89 se obtuvieron los valores de tensión y corriente consumida por una de las bombas peristálticas (bomba 1) para todo el ciclo de trabajo de PWM, también pudo observarse que el arranque del motor de la bomba se da alrededor de los 90 bits (es decir un ciclo de trabajo de alrededor del 35%) para la bomba 1.

Tensión en la bomba 1

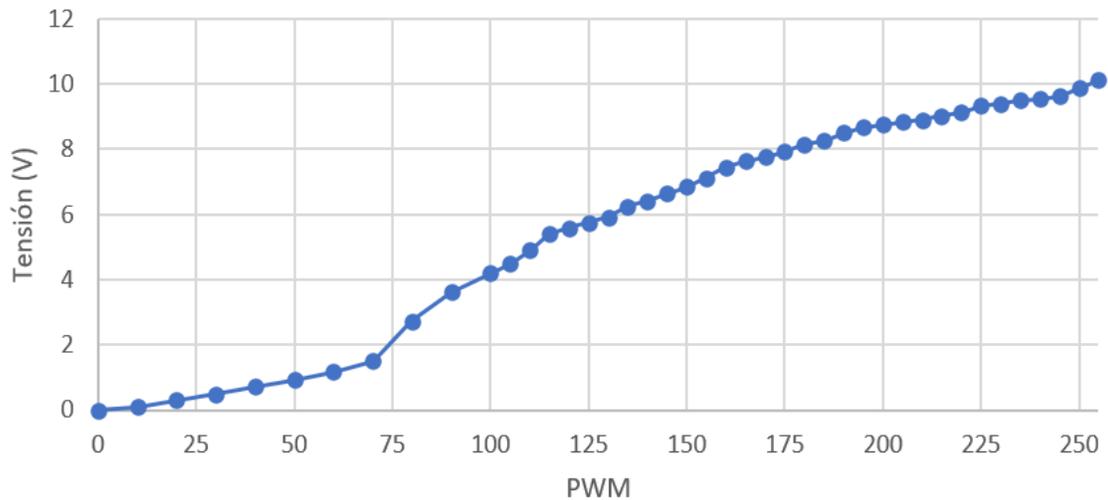


Figura 88 Mediciones de tensión en la bomba peristáltica 1

Corriente en la bomba 1

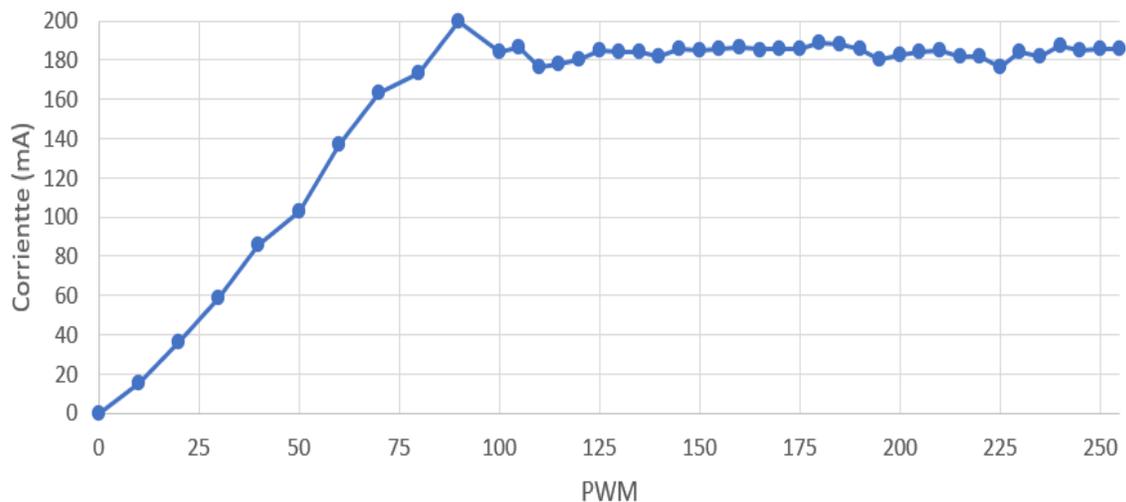


Figura 89 Mediciones de la corriente en la bomba peristáltica 1

La misma prueba realizada en la bomba 2 mostró mediante las gráficas de tensión y corriente mostradas en la Figura 90 y Figura 91 que el arranque del motor de esta bomba se da alrededor de los 80 bits (un ciclo de trabajo de alrededor del 31%) cercano al punto de arranque de la bomba 1.

Estos datos se obtuvieron al conectar en tarjeta de pruebas la integración del módulo 2.



Figura 90 Mediciones de tensión en la bomba peristáltica 2

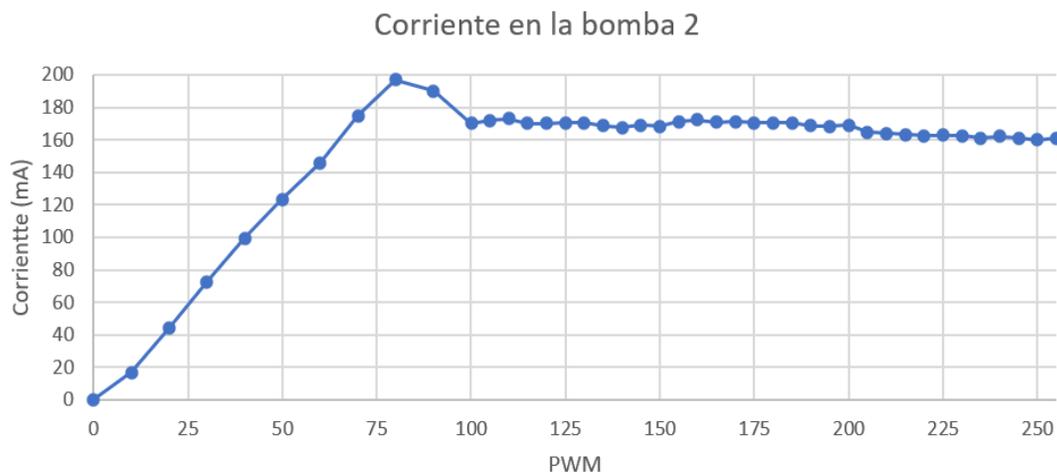


Figura 91 Mediciones de la corriente en la bomba peristáltica 2

Prueba 2. Flujo de sustancia a través de las bombas peristálticas.

Objetivo: Verificar el incremento en el flujo de sustancia entregada por las bombas peristálticas al aumentar el ciclo de trabajo de la señal PWM que representa control sobre las mismas.

Descripción: Se ejecutó un programa en la tarjeta de desarrollo que envía a los actuadores una señal PWM de 44, 55 y 90 durante un minuto, después envía un PWM de 0 durante 10 segundos para posteriormente enviar una señal de 180, de nuevo 0 y

finalmente 255 bits durante un minuto, (estas pausas para indicar el cambio en la señal y registrar la medición) Se midió la cantidad de sustancia que fluyó a través del actuador durante ese periodo con cada una de las tres señales PWM antes mencionadas mediante una taza medidora y una jeringa como se muestra en la Figura 92



(a) Medición de un PWM de 55



(b) Medición con un PWM de 90



(c) Medición con un PWM de 180



(d) Medición con un PWM de 255

Figura 92 Mediciones de la bomba de agua

Resultados: En la Tabla 70 se pueden observar las mediciones tomadas durante la prueba 2 donde B1y B2 hacen referencia a bomba peristáltica 1 y la bomba peristáltica 2. En la comparación se puede observar que la bomba 1 requiere una señal de tensión levemente superior a la que requiere la bomba 2, sin embargo, en esta prueba se observa que los actuadores mediante su circuito de acoplamiento responden como se esperaba a la señal de control.

Tabla 70 Flujo por minuto de las bombas peristálticas

Señal de control	(B1) Bomba de nutrientes	(B2) Bomba de agua
PWM (0-255)	Flujo por minuto	
44	0.0 ml	0.3 ml

55	0.6 ml	7.3 ml
90	21.6 ml	29.6 ml
180	49.8 ml	57.2 ml
255	61.4 ml	66.5 ml

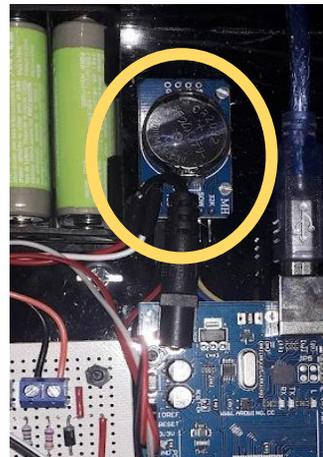
3.3 (S3) Sistema de Información

3.3.1 Implementación del módulo de medición (M3)

Para esta implementación se utilizaron los elementos propuestos en la etapa de diseño (Capítulo 2, sección 2.2.3.1). Se obtuvieron mediciones de los sensores de pH y CE colocados dentro del contenedor principal Figura 93 (a) y medición de temperatura y humedad colocado sobre la estructura hidropónica Figura 93 (c) y finalmente el circuito de reloj colocado dentro de la caja de componentes como referencia de tiempo para el módulo de procesamiento Figura 93 (b).



(a) Sensor de pH y CE



(b) Reloj externo



(c) Sensor de temperatura y humedad

Figura 93 Elementos del módulo de medición

Pruebas que fueron superadas satisfactoriamente quedando almacenados los datos de calibración de ambos sensores de modo que no sea necesaria una segunda calibración en sus 10 años de vida útil en el caso del sensor de CE mientras que en el caso del sensor de pH una vez al año los primeros años y cada seis meses los años posteriores.



(a) Calibración del sensor de pH



(b) Calibración del sensor de conductividad Eléctrica

Figura 95 Calibración de los sensores de pH y CE

Prueba 2. Prueba de funcionamiento del sensor de temperatura y humedad

Objetivo: Verificar el correcto funcionamiento del dispositivo utilizado para obtener la temperatura y humedad.

Descripción: Se realizó un código en la tarjeta de desarrollo Arduino que adquiere las mediciones obtenidas por el sensor y posteriormente son mostradas por la interfaz serial de la IDE de Arduino.

Se realizaron mediciones a la temperatura y humedad ambiental, así como en su exposición a aire tibio y aire frío para percibir cambios en la medición de temperatura.

Resultados: Se obtuvo una medición de la temperatura ambiente cercana al promedio registrado en el servicio de reporte del clima “weather.com” proporcionado por Google.com , así como cambios congruentes en la medición al acercarlo a una fuente de aire tibio y posteriormente aire frío, sin embargo, no se percibieron cambios en la medición de humedad al acercarlo a una fuente de aire húmedo y a una fuente de aire seco, consultando el problema con otros usuarios del modelo DHT22 se concluyó que podría deberse a un defecto de fábrica común en ese modelo del sensor (según usuarios de la comunidad de “fórum.arduino.cc”), de modo que se realizaron esas mismas pruebas con la segunda opción para este sensor (proceso de selección descrito en el Capítulo 2). El sensor modelo DHT11 presentó mediciones congruentes en las dos pruebas antes mencionadas, cuya principal diferencia con el sensor seleccionado es su precisión y resolución, como se puede observar en la Tabla 71, mismas que no representan ninguna incompatibilidad con el resto del sistema.

Tabla 71 Características principales de los sensores de temperatura y humedad

Parámetro	DHT11	DHT22
Precisión en temperatura	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Precisión en humedad	$\pm 5\%\text{RH}$	$\pm 5\%\text{RH}$
Resolución en temperatura	$1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Resolución en humedad	$1\%\text{RH}$	$0.1\%\text{RH}$
Frecuencia de muestreo	1 Hz	2 Hz

Prueba 3. Prueba de funcionamiento de los sensores de nivel

Objetivo: Comprobar el funcionamiento individual de los sensores de nivel

Descripción: Se conectó cada sensor en serie a un circuito de un resistor y un diodo emisor de luz como indicador.

Resultados: Se verificó el estado lógico en las dos posiciones de los sensores de nivel. En la Figura 96 (a) el interruptor se encuentra en circuito cerrado cuando el nivel de agua es alto, mientras que la salida del circuito sería un circuito abierto si el interruptor se encuentra en la posición mostrada en la Figura 96 (b).

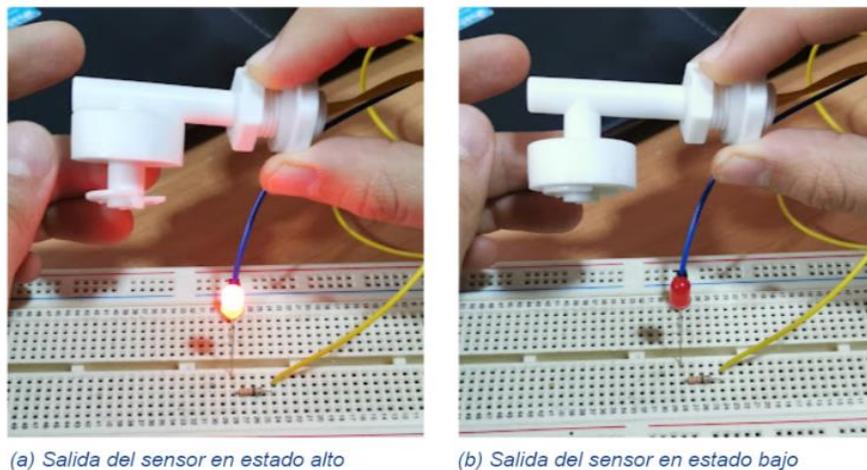


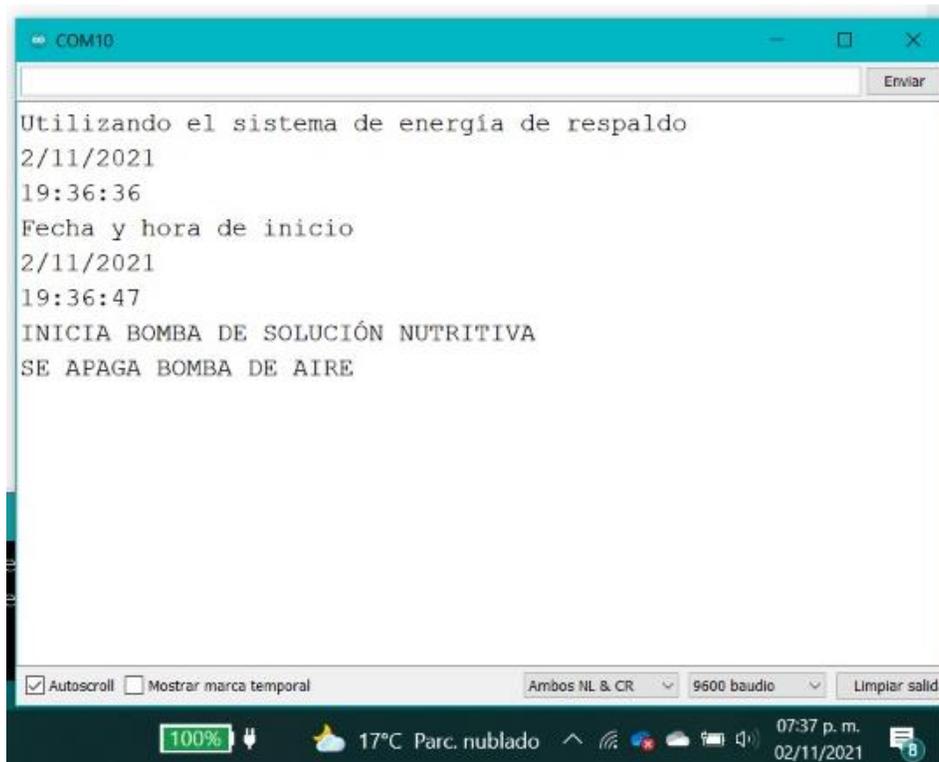
Figura 96 Salida del sensor de nivel con un led indicador

Prueba 4. Compatibilidad del reloj externo con el sistema de información

Objetivo: Verificar la compatibilidad de las funciones del reloj externo con el módulo de procesamiento.

Descripción: Se incorporó, al inicio de la ejecución del código principal del sistema, la sentencia para enviar mediante el monitor serial la fecha y la hora a fin de corroborar la correcta comunicación y lectura del dispositivo RTC DS3231 mediante la biblioteca “RTCLib”.

Resultados: En la Figura 97 se muestra una captura de pantalla del monitor serie de la tarjeta de desarrollo. El primer aviso muestra que el sistema detectó que no estaba conectado a una fuente de energía externa y registró la fecha y hora, posteriormente al presionar los botones de “reinicio” el sistema obtiene la fecha y hora de inicio y procede a iniciar la rutina de cultivo. En la imagen se puede observar el día y la hora en el escritorio donde se tomó la captura de pantalla, misma que fue tomada después de 15 segundos de haber activado el reinicio, de modo que el reloj es compatible con el sistema.



```
COM10
Utilizando el sistema de energía de respaldo
2/11/2021
19:36:36
Fecha y hora de inicio
2/11/2021
19:36:47
INICIA BOMBA DE SOLUCIÓN NUTRITIVA
SE APAGA BOMBA DE AIRE
```

The screenshot shows a serial monitor window titled 'COM10'. The text displayed is: 'Utilizando el sistema de energía de respaldo', '2/11/2021', '19:36:36', 'Fecha y hora de inicio', '2/11/2021', '19:36:47', 'INICIA BOMBA DE SOLUCIÓN NUTRITIVA', and 'SE APAGA BOMBA DE AIRE'. The window has a 'Enviar' button in the top right. At the bottom, there are checkboxes for 'Autoscroll' (checked) and 'Mostrar marca temporal' (unchecked), a dropdown menu set to 'Ambos NL & CR', a baud rate dropdown set to '9600 baudio', and a 'Limpiar salida' button. The Windows taskbar at the bottom shows 100% battery, 17°C weather, and the time 07:37 p.m. on 02/11/2021.

Figura 97 Datos obtenidos del inicio de un ciclo de cultivo.

3.3.3 Implementación del módulo de procesamiento (M4)

Se implementó el algoritmo de control difuso en la tarjeta Arduino Mega basado en las reglas difusas planteadas en la etapa de diseño (Capítulo 2, sección 2.2.3.3)., haciendo uso de los métodos que provee la biblioteca estandarizada “Embedded Fuzzy Logic Library” de código abierto compatible con la IDE Arduino y se conectó la tarjeta de desarrollo a los elementos del módulo de medición y al módulo de comunicación, mismo que fue colocado dentro de la caja de componentes alimentado por el circuito energético de respaldo.

3.3.4 Verificación

Tarjeta de procesamiento

Prueba 1. Compatibilidad de la tarjeta de desarrollo WemosESP32 con el IDE Arduino

Objetivo: Verificar la correcta operación y compatibilidad de la tarjeta de desarrollo WemosR3 con el entorno de desarrollo integrado Arduino.

Descripción: Se realizó la instalación del controlador para la tarjeta, se agregó el modelo de la del dispositivo al gestor de tarjetas adicionales y se probó la comunicación serie, así como la implementación de un código que muestra las lecturas de un puerto ADC.

Resultados: No fue posible establecer una comunicación mediante el puerto serial con la tarjeta de desarrollo en dos de tres equipos de cómputo. En el equipo que se logró la comunicación con la tarjeta se observó una compatibilidad limitada en los comandos de programación del entorno de desarrollo Arduino.

Algoritmo de control difuso

Prueba 2. Verificación del algoritmo de control en la tarjeta Arduino Mega.

Objetivo: Verificar las salidas del sistema de control implementado en el módulo de procesamiento.

Descripción: Para el módulo de procesamiento se escribió el código de control a implementar en la tarjeta de desarrollo Arduino, del cual se registraron todas las salidas para un rango de entradas de pH de 3.0 a 7.0 con un incremento de 0.1 en cada medición, manteniendo el error en conductividad en -200. Posteriormente se registraron las salidas para estos valores en el algoritmo simulado en el entorno LabVIEW, documentado en el capítulo 2 sección 2.2.3.3.

Resultados: Mediante el registro de las mediciones se realizó la gráfica que se muestra en la Figura 98 Donde se puede observar que los valores obtenidos de las dos salidas del sistema son suficientemente cercanos a los valores obtenidos en la misma prueba aplicada en simulación dado que las salida PWM (eje Y) del sistema de control se utilizan solo los valores enteros de modo que se verificó que las salidas obtenidas por el sistema de control implementado en la tarjeta de desarrollo coincidieran con las obtenidas en simulación.

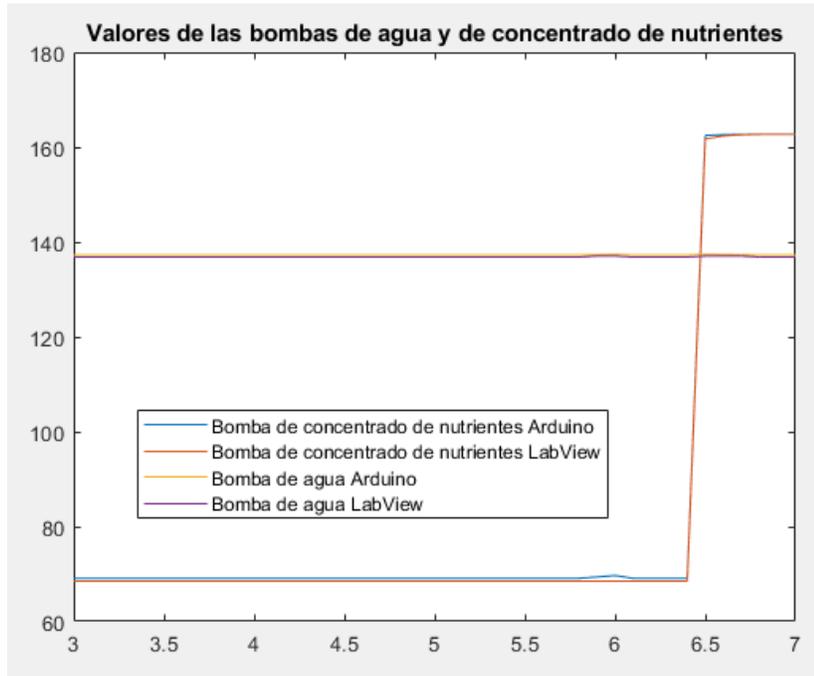


Figura 98 Gráfica de la respuesta de las dos salidas del control en la tarjeta de desarrollo y en simulación

3.3.5 Implementación del módulo de comunicación (M5)

Comunicación interna

La comunicación interna se realiza a través de las señales digitales enviadas a los circuitos de potencia de los módulos 1 y 2. Mismas que se verificaron mediante el monitor serie del entorno de desarrollo Arduino, para la señal PWM del módulo 2 la comunicación se verifica mediante el encendido y apagado de un LED indicador en el relevador como se muestra en la Figura 99 para las bombas de corriente alterna para el módulo 1 y para el sensor de conductividad que se comunica mediante un puerto serial como puede observarse en la Figura 100.



(a) Indicador de comunicación encendido



(b) Indicador apagado

Figura 99 Indicadores de comunicación (M1)



(a) Indicador encendido



(b) Indicador apagado

Figura 100 Indicadores de comunicación del sensor de conductividad

Comunicación externa

La comunicación externa se realizó a través del módulo Arduino Ethernet Shield el cual se conectó directamente sobre el Arduino Mega como se muestra en la Figura 101, el módulo se puede identificar por el marco amarillo que lo rodea. Este módulo cuenta con un conector RJ45, a través de dicho conector se realizó la conexión con un modem utilizando un cable UTP.



Figura 101 Montaje ethernet shield sobre Arduino Mega

Verificación

Prueba 1. Verificación de conexión a un servidor usando el módulo Arduino Ethernet Shield.

Objetivo: Verificar que la comunicación puede establecerse correctamente.

Descripción: Para esta prueba se utilizó el código que permite la conexión entre el módulo de Arduino Ethernet Shield y un servidor [64]. En este código se especifica que, si la conexión entre estos pudo realizarse y es correcta, entonces se imprime en el monitor serie de Arduino la palabra connected, posteriormente se muestran los datos que se han enviado a la página web especificada en el código y enseguida se muestra la petición que se realizó. En el presente proyecto se realizan peticiones POST. Para asegurar que la petición se realizó correctamente se imprime el contenido de la variable

que el servidor está recibiendo, al final de esta variable viene concatenado un HTTP/1.1 200 OK el cual quiere decir que la petición realizó correctamente. Lo anterior se ejemplifica en la Figura 102.

```
Initialize Ethernet with DHCP:
connecting...
IP Address: 192.168.1.70connected
Sent1
var1=1.00
Sent2
&var2=2.00
Sent3
&var3=3.00
Sent4
&var4=4.00
Sent5
&var5=5.00
Sent6
&var6=6.00
Sent7
&var7=7.00
Sent8
&var8=8.00
Sent9
&var9=9.00
Sent10
&var10=10.00
POST /inc/registro-datos.php HTTP/1.1
Host: ttlechugas.000webhostapp.com
Content-Type: application/x-www-form-urlencoded
Content-Length:
101
var1=1.00&var2=2.00&var3=3.00&var4=4.00&var5=5.00&var6=6.00&var7=7.00&var8=8.00&var9=9.00&var10=10.00HTTP/1.1 200 OK
Date: Wed, 01 Dec 2021 02:33:21 GMT
Content-Type: text/html; charset=UTF-8
Content-Length: 0
Connection: keep-alive
Server: awex
X-Xss-Protection: 1; mode=block
X-Content-Type-Options: nosniff
X-Request-ID: 814a853178a4693000c7b0b3ded54c63
```

Figura 102 Monitor Serie Arduino prueba de conexión ethernet.

Prueba 2. Comprobar que los datos fueron almacenados en la base de datos en el orden correspondiente al que se enviaron

Objetivo: Realizar el envío de datos en el orden establecido para el ingreso de estos en los campos correspondientes en la base de datos.

Descripción: Para esta prueba se declararon diez variables nombradas como var1, var2 y así sucesivamente hasta var10. Se les asignó un valor flotante del 1 al 10 correspondientemente.

El envío de datos se realizó en orden ascendente y las variables enviadas se asignaron a las llaves de la base de datos. De esta forma se aseguró que los valores enviados desde el Arduino se almacenaron en el orden y columna deseada de la base de datos. Lo anterior se ejemplifica en la Figura 103.

Figure 103 shows a screenshot of the phpMyAdmin interface. The browser address bar shows the URL: `databases-auth.000webhost.com/sql.php?server=1&db=id17824465_ttlechugas&table=parametros&pos=0`. The interface displays the 'parametros' table structure and a list of 20 records. The columns are: id, ph, ce, temp, hum, fecha, hora, sntanqa, sntanqn, sntanqsn, and observ. The records show a sequence of values for each column, with 'id' ranging from 11384 to 11413. The 'observ' column contains the value '10.00' for all records.

id	ph	ce	temp	hum	fecha	hora	sntanqa	sntanqn	sntanqsn	observ
11384	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00					10.00
11385	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00					10.00
11386	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00					10.00
11387	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00				10.00
11388	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00				10.00
11389	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00				10.00
11390	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00				10.00
11391	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00				10.00
11404	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11405	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11406	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11407	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11408	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11409	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11410	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11411	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11412	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00
11413	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	9.00	7.00	10.00

Figura 103 Registro de valores en base de datos.

3.4 (S2) Sistema energético

3.4.1 Implementación

La implementación del sistema energético consiste en la distribución de energía acondicionada a través de todos los elementos del sistema que la requieren, así como la activación del “circuito de respaldo” cuando no se tiene una fuente de energía de CA.

Interactúa en el sistema 1 con el módulo 1 mediante el acondicionamiento para los actuadores, pues, requieren 127 V de corriente alterna y su activación se realiza mediante los dispositivos resaltados como “Acondicionamiento M1” en la Figura 104. También se encarga del manejo de la energía que alimenta las bombas peristálticas (módulo 2) mediante el módulo de “Acondicionamiento (M2)” basado en el arreglo Darlington de transistores propuesto en el Capítulo 2 (sección 2.2.4.1) que a partir de una señal PWM de 5V proporciona un rango de tensión de 0 V a 12 V proveniente de la “Fuente de 12 V”. Finalmente se encarga del acondicionamiento de energía de 12 V a 5 V mediante un regulador de tensión para la alimentación del módulo de medición en el sistema 3.

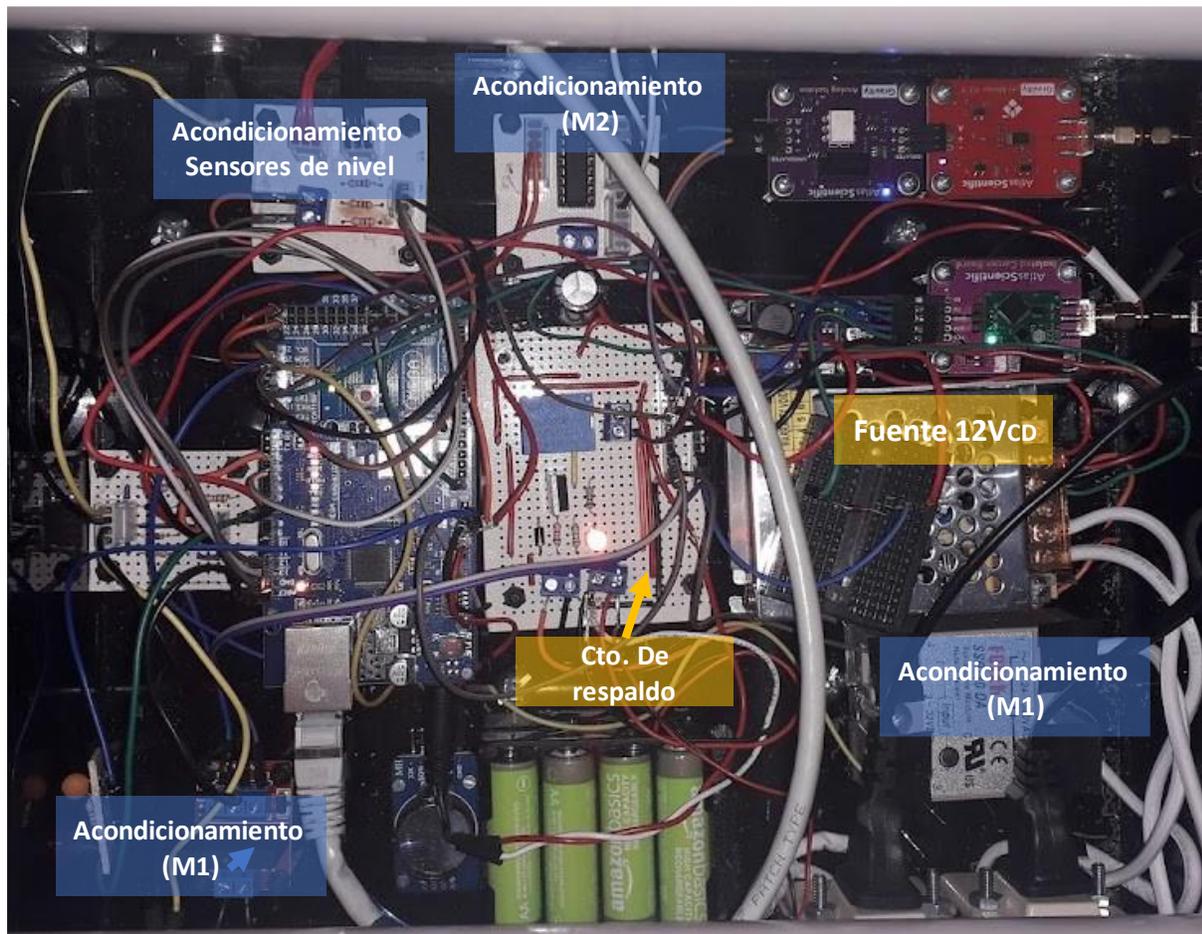


Figura 104 Implementación del sistema energético

3.4.2 Verificación

Prueba 1. Circuito de respaldo en tarjeta de pruebas

Objetivo: Verificar el funcionamiento del circuito de respaldo.

Descripción: Se conectó una fuente de 12V y una de 5 V a las entradas del circuito de respaldo con una sola salida en una tabla de pruebas.

Resultados: Se observaron 12 V en el multímetro a la salida del circuito y el LED indicador encendido como se muestra en la Figura 105 cuando el circuito esta alimentado con la fuente principal y 5 V si el circuito no se encuentra alimentado mediante la fuente de 12 V.

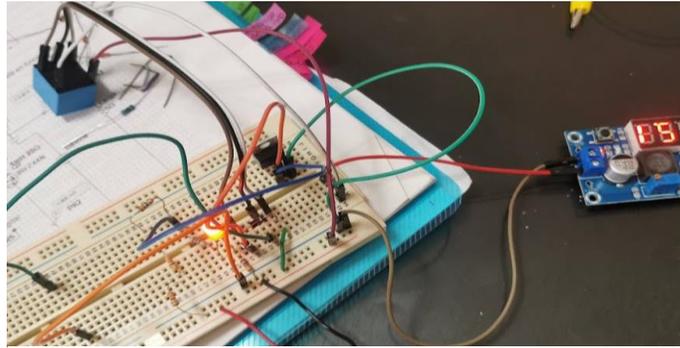


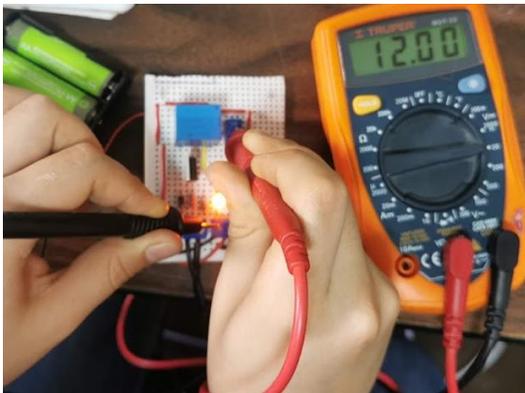
Figura 105 Prueba 1 del circuito de energía de respaldo

Prueba 2. Circuito de respaldo de energía en placa final.

Objetivo: Verificar la conmutación de la fuente principal a la fuente de respaldo.

Descripción: Se conectó una fuente de 12V y una de 5 V a las entradas del circuito de respaldo con una sola salida.

Resultados: Se observaron 12 V en el multímetro a la salida del circuito cuando el circuito tiene a su entrada una fuente de alimentación activa de 12 V como se muestra en la Figura 106 (a) y 5 V si la fuente de 12 V se encuentra inactiva: Figura 106 (b).



(a) Fuente de 12 V conectada



(b) Fuente de 12 V desconectada

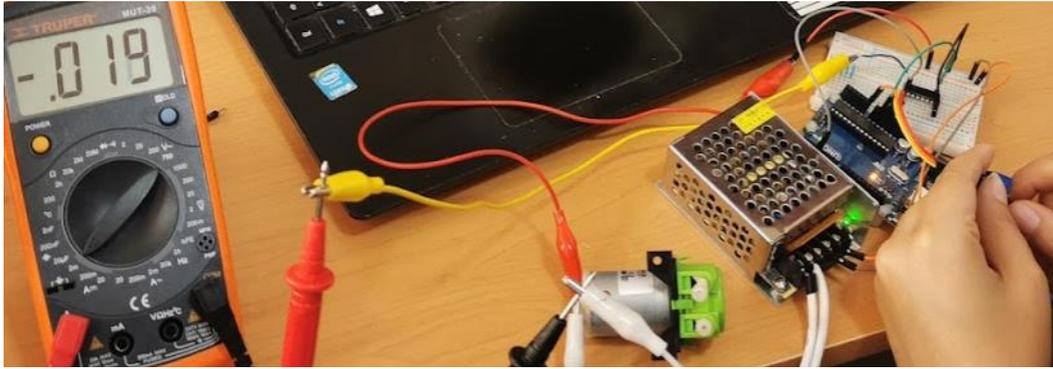
Figura 106 Circuito de respaldo

Prueba 3. Circuito acondicionamiento del módulo 2 en tarjeta de pruebas

Objetivo: Verificar el funcionamiento del circuito de acondicionamiento del módulo 2

Descripción: Se suministró al circuito de acoplamiento una señal PWM de 0 a 255 y se registraron las mediciones de corriente y tensión en el actuador conectado a la salida como se muestra en la Figura 107

Resultados: Se registraron las mediciones obtenidas cada 5 bits y se pudo observar el aumento progresivo de tensión en el actuador como se esperaba de este circuito.



(a) Medición de corriente con un PWM de 0 en la bomba 2



(b) Medición de tensión con un PWM de 155 en la bomba 2

Figura 107 Prueba del circuito de acondicionamiento (M2)

Consumo energético

En la Tabla 72 se muestran las mediciones de consumo de corriente de los componentes del sistema.

Tabla 72 Consumo energético medido de los componentes de CD del sistema

Módulo	Componente	Tensión	Corriente de operación
M4 Procesamiento	Tarjeta de procesamiento	12 V	230 mA
M3 Medición	Sensor de pH	3.3 V	33.3 mA
	Sensor de CE	3.3 V	52.6 mA
	Sensor de temperatura y humedad	3.3 V	1.6 mA
	Sensor de nivel (x3)	3.3 V	5 mA

	Dispositivo RTC	3.3 V	0.2 mA
M2 Concentración de solución	Bomba peristáltica (x2)	12 V	230 mA
	ULN2003	3.3 V	1 mA
M1 Flujo de solución	Relevador SSR	5 V	6.36 mA
	Relevador Edo. Solido	5 V	13.1 mA

Consumo de corriente del sistema con el circuito de respaldo:

Cuando se activa el circuito de respaldo solo permanece alimentada la tarjeta de desarrollo y los elementos que esta energiza consumiendo 170 mAh, según la medición.

De modo que las pilas pueden alimentar este circuito por aproximadamente 14 horas.

Consumo de corriente del sistema electrónico completo:

La fuente principal de 12 V alimenta un convertidor de tensión DC-DC que consume 42.5 mA, la tarjeta de desarrollo que consume 280 mA y las bombas peristálticas que en su potencia máxima consumen 200 mA cada una, de modo que el máximo consumo de corriente del sistema es 722.5 mAh.

Dado que la bomba principal consume 8 W, la bomba de aire 3 W y la potencia consumida por la fuente de corriente directa es de 8.6 W, la potencia máxima consumida por el sistema en una hora sería de 19.6 W.

3.5 (M6) Interfaz Gráfica

3.5.1 Implementación

Para el diseño de la interfaz gráfica de usuario se usó HTML y CSS, mientras que para el backend de la página web se utilizó PHP. Todos los archivos relacionados con el funcionamiento de la página web fueron cargados a un hosting gratuito llamado 000webhost para poder tenerla en un servidor no local y tener acceso a la página a través de una URL.

En la Figura 108 se muestran los componentes de la interfaz de usuario en donde podemos apreciar los valores de temperatura, humedad, pH, CE, los estados de los

sensores de nivel correspondientes a cada uno de los contenedores de solución nutritiva, concentrado y agua, así como un mensaje en el apartado de información general que permite saber que tarea está realizando el sistema.

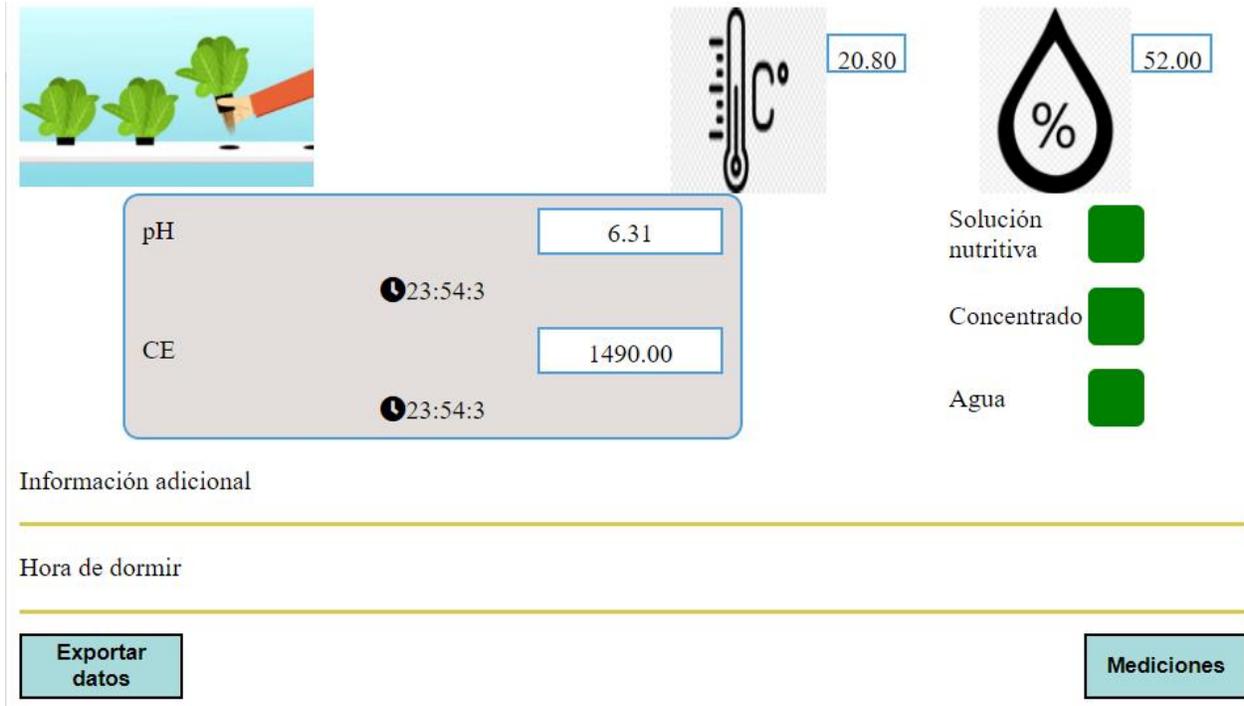


Figura 108 Datos necesarios para el usuario

3.5.2 Verificación

Prueba 1. Acceso a la página web elaborada y visualización de los datos requeridos por el usuario.

Objetivo: Determinar si la página puede cargarse en el navegador del dispositivo móvil o desde una computadora y se pueden visualizar los datos de principal importancia para el usuario.

Descripción: Se ingresó a <https://ttlechugas.000webhostapp.com/>, URL de la página web elaborada. Posteriormente se verificó que las imágenes, los cuadros de texto, iconos, botones y texto en general que conforman a la página, se visualizaran de acuerdo con el tamaño y la distribución indicada.

Resultados: En la Figura 109 (a) se muestra el ingreso a la URL de la página web <https://ttlechugas.000webhostapp.com/>, posteriormente se muestra en la Figura 109 (b) y (c) que se logró acceder al sitio web desde un dispositivo móvil, así como desde una computadora. Todos los elementos visuales que conforman a la página web y ventana

principal se cargaron correctamente y se encontraron de acuerdo con la distribución deseada.

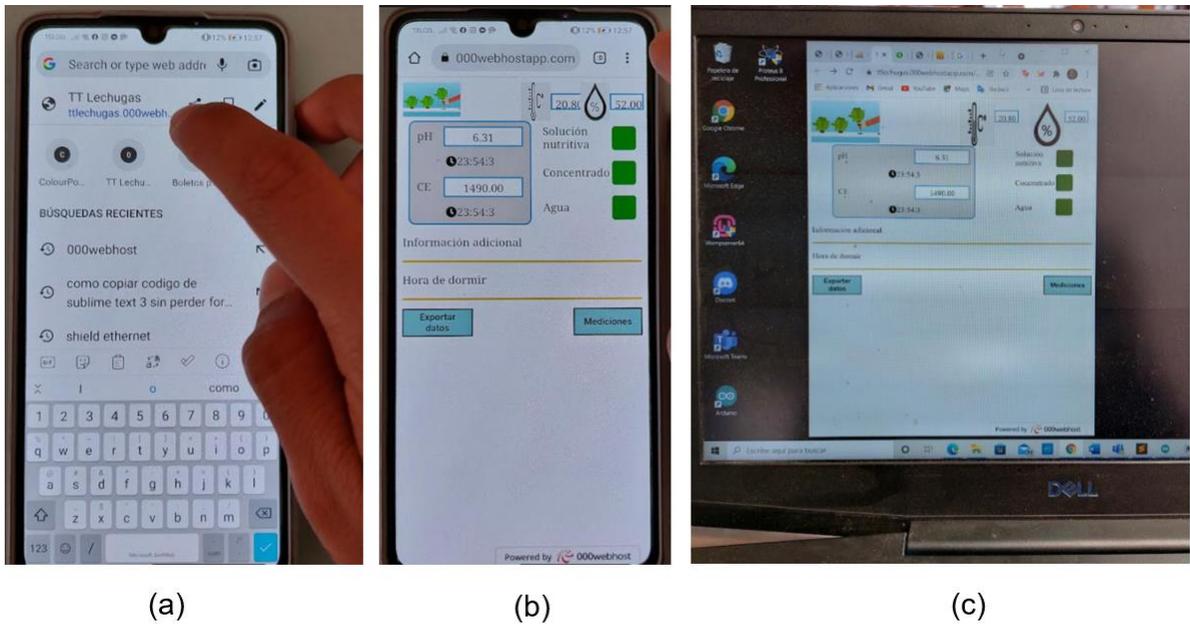


Figura 109 Pruebas URL página web

Prueba 2. Funcionamiento del botón de mediciones de la interfaz de usuario.

Objetivo: Mostrar las últimas 16 mediciones recabadas en la base datos a través de una tabla que contenga los valores de las mediciones realizadas por los sensores de pH, CE, temperatura y humedad.

Resultados: En la Figura 110 (a) y (b) se demuestra que después de pulsar el botón de mediciones, la interfaz cambia de ventana y muestra la tabla con las dieciséis últimas mediciones almacenadas en la base de datos.

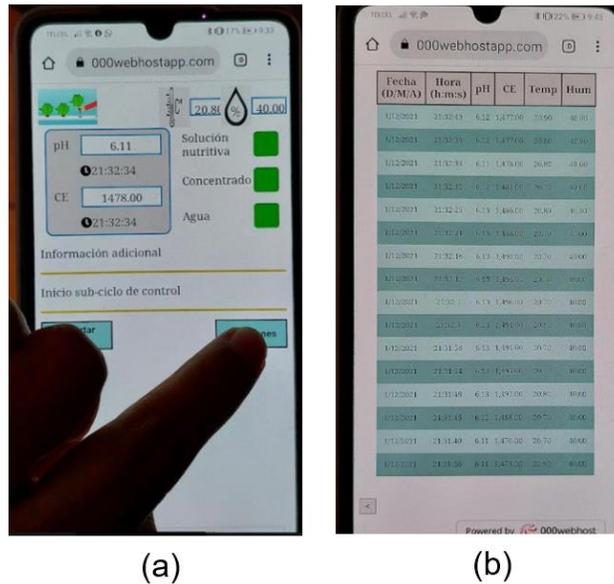


Figura 110 Prueba botón de mediciones.

Prueba 3. Funcionamiento del botón de exportar datos de la interfaz de usuario.

Objetivo: Seleccionar un día anterior a la fecha 7 de diciembre de 2021 y comprobar que se puede realizar la descargar de un archivo pdf con todas las mediciones recabadas durante ese día.

Resultados: En la Figura 111 (a) y (b) se demuestra que después de pulsar el botón de exportar datos, la interfaz cambia de ventana y muestra la opción para seleccionar la fecha deseada del reporte que se quiere generar. Posteriormente se procedió a seleccionar el día 6 de diciembre de 2021 como se muestra en la Figura 111 (c). Al dar clic en el botón descargar aparece una pantalla emergente dando aviso que se descargará el reporte. Se dio clic en ok como se muestra en la Figura 111 (d) y el reporte se descargó correctamente como se muestra en la Figura 111 (e) y (f).

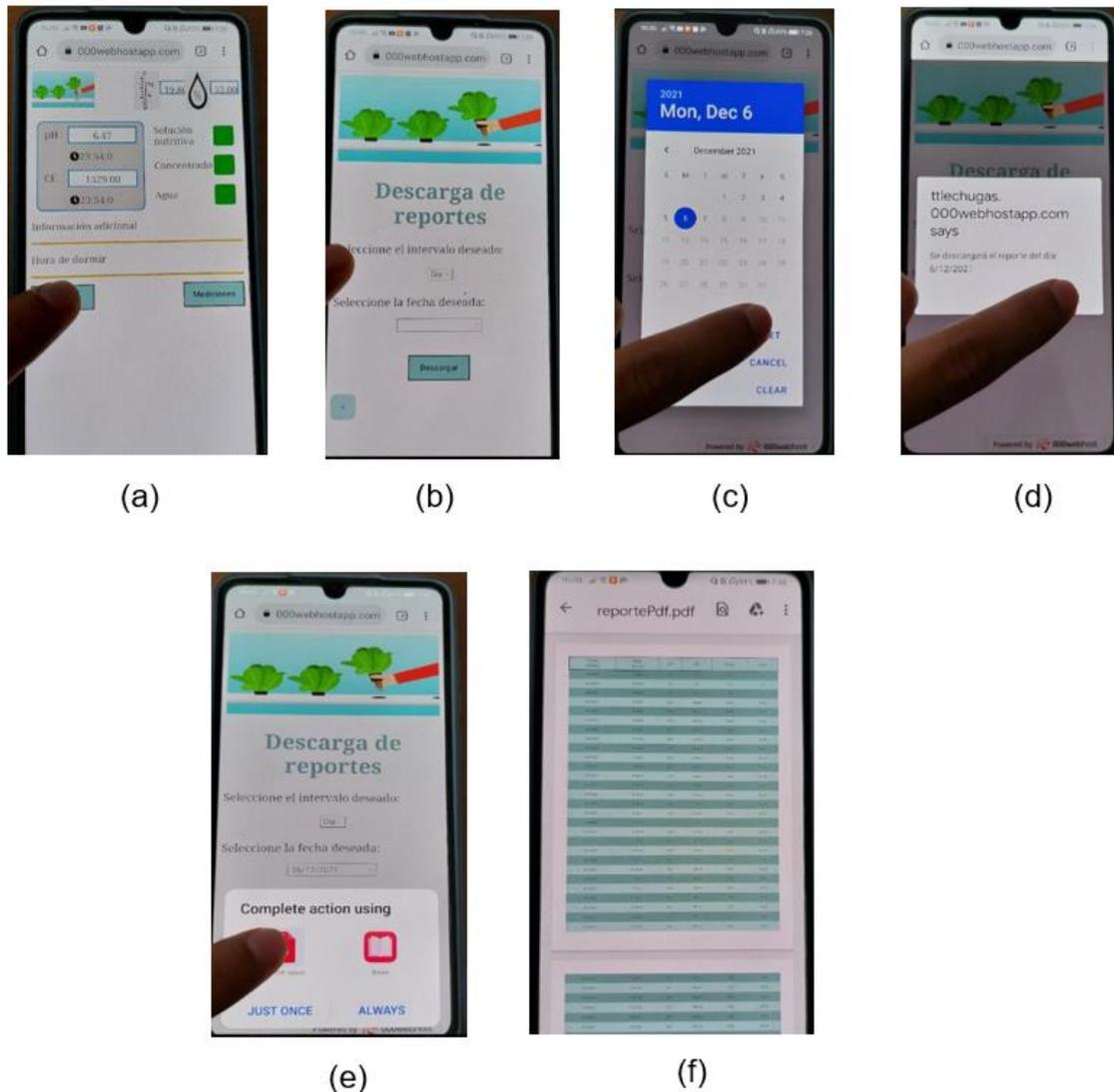


Figura 111 Prueba botón de exportar datos

3.6 Integración del sistema estructural completo (S1, S2, S3 y S4)

3.6.1 Verificación

Para la verificación del funcionamiento de estos cuatro sistemas, se consideraron:

Sustancia	Cantidad en Litros
Solución nutritiva	30 L
Concentrado de solución	10 L
Agua	20 L

Contenedor principal:

Mínimo de litros para cubrir la bomba de agua	12 L
Mínimo de litros para que el sistema permita un flujo (interrupción del sensor de nivel)	24 L

Contenedor agua:

Mínimo de litros para que el sistema permita un flujo (interrupción del sensor de nivel)	2.5 L
--	-------

Contenedor de nutrientes:

Mínimo de litros para que el sistema permita un flujo (interrupción del sensor de nivel)	2.5 L
--	-------

Prueba 1. Comportamiento de las mediciones de los sensores de pH, conductividad, temperatura y humedad en la solución nutritiva

Objetivo: Verificar que las mediciones de dichos sensores no oscilen en un rango demasiado amplio conforme las condiciones del día van cambiando.

Descripción: Se conectó el sistema S2 al tomacorriente para que se alimentaran los sistemas S1 y S3. El sensor de pH y el de conductividad se colocaron en la solución nutritiva la cual estaba un poco más básica de lo que se requiere en el sistema hidropónico. El sensor de temperatura y humedad se colocó en la parte de arriba del sistema S4 porque es la temperatura y humedad que van a sentir las lechugas que están más directas a la luz solar y por ende al calor. El módulo M4 realizaba una rutina donde la bomba de flujo de solución nutritiva se activaba durante 7 minutos, luego 8 minutos la bomba de aire, posterior a estos 15 minutos se activaba la lectura de los sensores durante 15 minutos, se enviaba a la interfaz dichos valores de los sensores al inicio de esta etapa

y luego 10 minutos después se volvía a enviar la lectura de los sensores. Por lo que el tiempo entre medidas era 10 y 20 minutos.

Resultados: En las siguientes gráficas, se observa el comportamiento de las mediciones realizadas desde las 12:06 del día 27 de noviembre 2021 hasta las 12:16 del 28 de noviembre 2021. Cabe resaltar que el sistema está programado para que a las 18:00 se apague y a las 8am se vuelva a iniciar con la bomba de flujo de solución nutritiva que es el intervalo de tiempo que hay luz solar y que las lechugas necesitan consumir solución nutritiva.

Los valores utilizados para las gráficas se obtuvieron de la base de datos de la interfaz, los cuales fueron exportados a .csv y procesados con Excel.

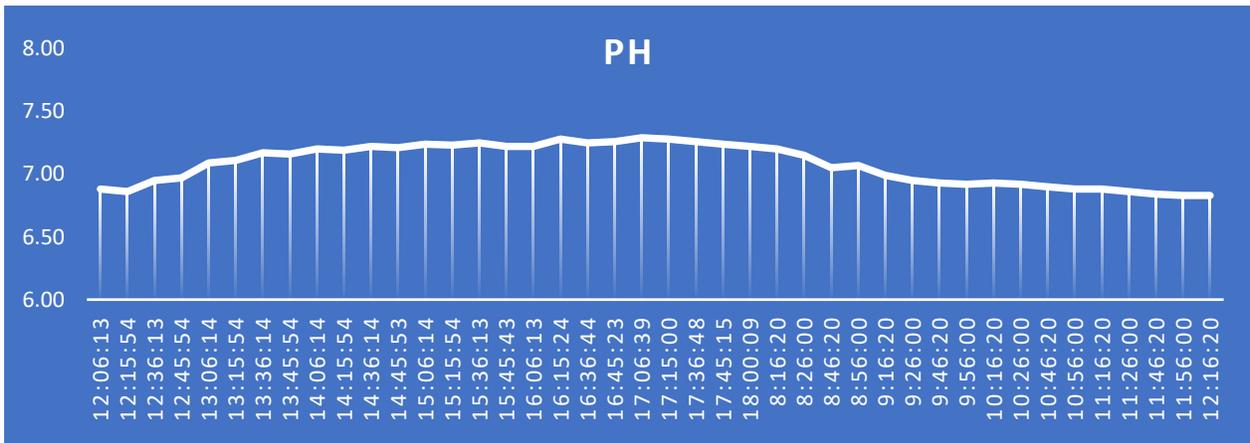


Figura 112 Gráfica del comportamiento de las mediciones de pH

En la Figura 112 se muestran las mediciones obtenidas del sensor de pH a lo largo de los días de prueba. Se puede observar un comportamiento donde oscilan los valores entre 6.8 y 7.3; estas variaciones a lo largo del día pueden ser ocasionadas por agentes externos al sistema como el polvo y la temperatura de la solución nutritiva, pero no hay una oscilación donde los valores sean extremos como si de repente la sustancia fuera básica y a los 10 o 20 minutos fuera ácida.

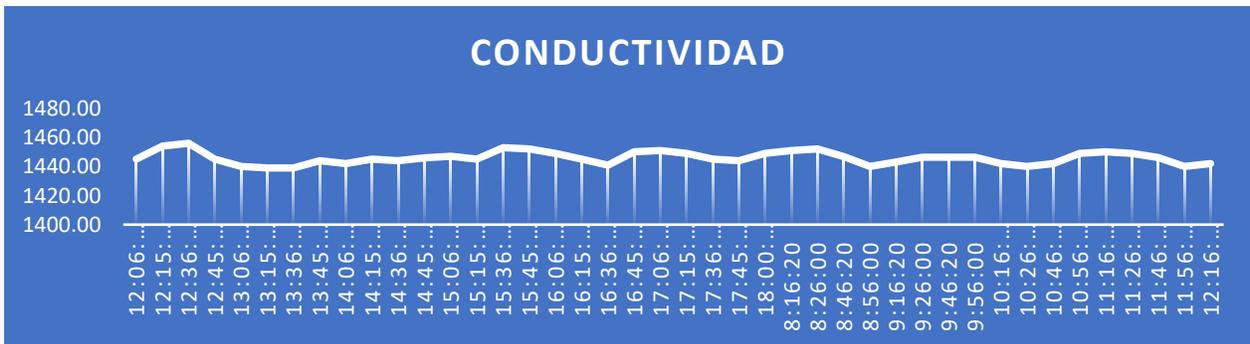


Figura 113 Gráfica del comportamiento de las mediciones de conductividad

En la Figura 113 se muestran las mediciones obtenidas del sensor de conductividad a lo largo de los días de prueba. Se puede observar un comportamiento donde oscilan los

valores entre 1430 y 1456; las variaciones a lo largo del día pueden ser ocasionadas por agentes externos al sistema como el polvo y la temperatura de la solución nutritiva, pero no hay una oscilación donde los valores muestren que la sustancia es poco conductiva y la siguiente medición muestre que la sustancia es muy conductiva.

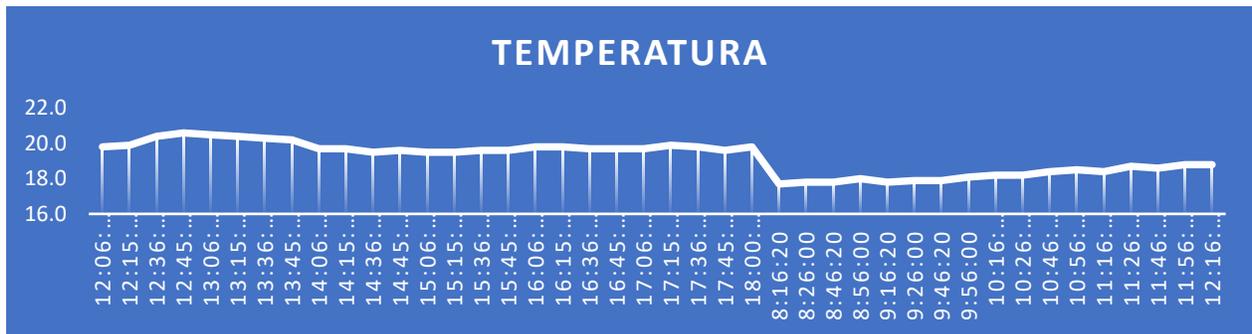


Figura 114 Gráfica del comportamiento de las mediciones de temperatura ambiental

En la Figura 114 se muestran las mediciones obtenidas del sensor de temperatura a lo largo de los días de prueba. Se puede observar un comportamiento donde la temperatura incrementa paulatinamente para después disminuir conforme avanzan las horas. Para las 8am del siguiente día se muestra como inicia en 17.7° y va subiendo la temperatura conforme avanza el día.

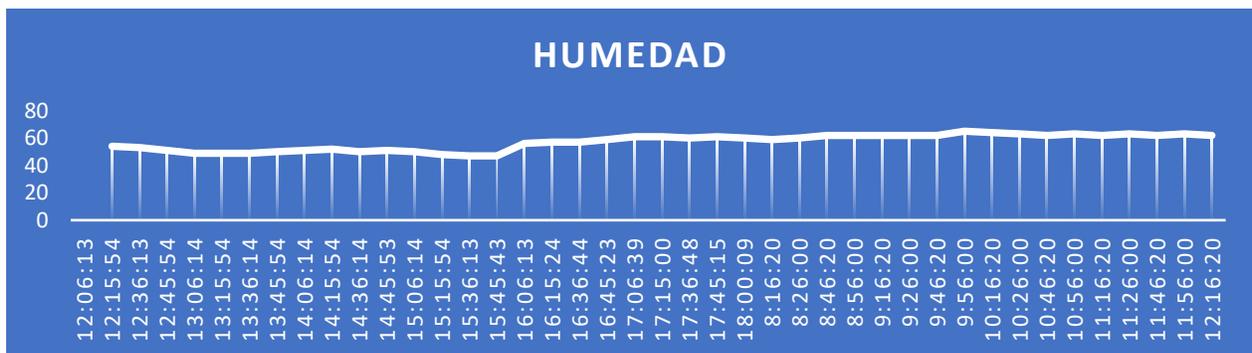


Figura 115 Gráfica del comportamiento de las mediciones de humedad ambiental

En la Figura 115 se muestran las mediciones obtenidas del sensor de humedad a lo largo de los días de prueba. Se puede observar un comportamiento donde la humedad se mantiene casi estable hasta la tarde-noche del primer día de pruebas y la mañana del siguiente día con un ligero aumento a comparación de la humedad que existía a medio día del primer día de la prueba.

Prueba 2. Control de la solución nutritiva alterada manualmente para ser una sustancia básica con baja conductividad

Objetivo: Obtener el tiempo y la cantidad de concentrado de nutrientes y/o agua necesita la solución nutritiva para regresar a los valores deseados de pH y conductividad.

Descripción: Se alteró de forma manual la solución nutritiva para tener un pH de 7 y una conductividad de 1236, valores fuera del rango deseado. Para posteriormente todos los sistemas en conjunto estabilizaran la solución nutritiva a los valores deseados.

Resultados: Se registraron los tiempos y las cantidades de cada sustancia que fue agregada a la solución nutritiva para lograr que ésta estuviera en los rangos deseados. Con esto, se pudo observar y cuantificar si el control difuso, las bombas peristálticas y los sensores eran suficientes para el objetivo del sistema. A su vez se observó el comportamiento en la interfaz de usuario y la base de datos donde se guardaron dichos valores y tiempos. Estos son observados en la Tabla 73 y en la Tabla 74.

Tabla 73 Valores de pH y conductividad registrados después de agregar agua de forma manual a la solución nutritiva

pH Inicial=6.52		Conductividad Inicial=1425mS	
pH	Conductividad	ml de agua agregados de forma manual	
6.7	1358	680	
6.9	1304	2600	
7	1236	3000	

pH esperado después del control =6.5

Tabla 74 Valores de pH y conductividad registrados después de ejecutar el control difuso en los contenedores

pH	Conductividad	ml de concentrado agregados con el control	Tiempo transcurrido (min)
7	1236	-	-
6.9	1277	750ml	9.44
6.7	1310	530ml	19.54
6.5	1344	600ml	29.50

Esta prueba se repitió de forma inversa (en lugar de una solución básica se utilizó una solución ácida). Con el fin de realizar el proceso a la inversa para saber si el control es capaz de llevar una solución ácida a los parámetros deseados.

Descripción: Se alteró de forma manual la solución nutritiva para tener un pH de 5.5 y una conductividad de 1465, valor de pH fuera del rango deseado. Para posteriormente, todos los sistemas en conjunto estabilizaran la solución nutritiva a los valores deseados.

Resultados: Se registraron los tiempos y las cantidades de cada sustancia que fue agregada a la solución nutritiva para lograr que ésta estuviera en los rangos deseados. Con esto, se pudo observar y cuantificar si el control difuso, las bombas peristálticas y los sensores eran suficientes para el objetivo del sistema. A su vez observa el comportamiento en la interfaz de usuario y la base de datos donde se guardaron dichos valores y tiempos. Estos son observados en la Tabla 75 y la Tabla 76.

En ambas pruebas, la bomba peristáltica que vierte el líquido necesario para regular la solución nutritiva necesita un PWM de 140, mientras que la bomba que no está fluyendo líquido se mantiene con un PWM de 69.

Tabla 75 Valores de pH y conductividad registrados después de agregar concentrado de nutrientes de forma manual a la solución nutritiva

pH Inicial=6.52 Conductividad Inicial=1344mS		
pH	Conductividad	ml de concentrado agregados de forma manual
6	1431	1440
5.8	1457	480
5.6	1461	240
5.5	1465	240

Tabla 76 Valores de pH y conductividad registrados después de ejecutar el control difuso en los contenedores

pH	Conductividad	ml de agua agregados con el control	Tiempo transcurrido (min)
5.5	1465	-	-
5.6	1449	710	9.10
5.8	1436	760	20.30
6	1417	1280	36.05

Capítulo 4. Análisis de resultados

4.1 Análisis de Ingeniería

4.1.1 Resultados globales

Mediante la verificación de los módulos, así como también de la integración por sistema se pudieron determinar distintos parámetros de funcionamiento en cada uno de ellos.

Del módulo 1: Flujo de solución

Se determinó que la bomba seleccionada para hacer fluir la solución nutritiva a los canales de PVC es suficiente, sin embargo, para un sistema más grande podría no ser suficiente. Por lo que dicha bomba es suficiente para el prototipo desarrollado en este proyecto. Así mismo, la bomba de aire es necesaria para mezclar el concentrado de nutrientes y el agua con la solución nutritiva mientras son agregadas por el módulo 4; esto se determinó durante la verificación de la integración del sistema estructural completo en el Capítulo 3 del presente trabajo.

Del módulo 2: Concentrado de solución

Para este módulo se determinó, con las pruebas realizadas, que para alterar la solución nutritiva es mucho más sensible con el concentrado de nutrientes que con el agua. Por lo que cuando las lechugas consuman más nutrientes, el control agregaría menos ml de concentrado de nutrientes, ya que esta sustancia incrementa los valores de acidez y conductividad con menor cantidad. Por otro lado, si consumen más agua y el sistema tuviera que agregarla, y aunque ésta si modifica los valores de pH y conductividad necesita mayor cantidad para incrementar los valores y equilibrar la solución.

Del sistema 2: Sistema Energético

Revisando los sistemas, se detectó que una de las posibles causas asociadas a un error en el funcionamiento del sistema se relaciona con el ruido causado por los motores de corriente alterna (bomba de flujo de la solución nutritiva y la bomba de aire) así como los motores de corriente directa (las bombas peristálticas) ya que al iniciar su movimiento consumen más corriente y estos provocan ruido en las señales de entrada del módulo de procesamiento. Dentro de la implementación se utilizaron capacitores y se cambiaron los relevadores mecánicos por relevadores de estado sólido, con el fin de evitar causar algún

error dentro del sistema, en especial en el procesamiento de datos. También, otra causa de errores sería con el sistema de respaldo, si las pilas no tienen suficiente carga para alimentar al M4, éste podría hacer o enviar valores no deseados o incongruentes a la interfaz; por lo que el usuario debe de estar atento de la carga de las pilas.

Del módulo 3: Medición

Después de la implementación de este módulo se determinó que los sensores podrían tener un rango de variación en las mediciones incluso si la solución no presenta variaciones causadas con intención del usuario o por las lechugas. Estas variaciones podrían ser causadas por la temperatura de la solución ya que la ideal es de 25°C y el proyecto no controla la temperatura de la solución nutritiva por lo que podrían existir dichas variaciones. Además de que la precisión del sensor de conductividad es de $\pm 2\%$ por lo que en el rango del 1400 a 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se tendría una precisión de ± 28 a ± 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo que causaría también estas variaciones. Sin embargo, para el sistema donde se tiene un rango amplio en los valores deseados estas variaciones mostradas en las gráficas de la Figura 112 y Figura 113 no significarían un problema ya que no son valores opuestos se mantienen dentro de un rango y el control y las mediciones al realizarse continuamente se ajustarían con los valores medidos, adicionalmente las bombas peristálticas funcionan por goteo rápido por lo que la cantidad de líquido suministrado, en caso de una medida errónea comparada con muchas otras cercanas al valor real no significaría una alteración en la solución nutritiva.

Del módulo 4: Procesamiento

Como parámetros obtenidos de la integración del sistema es que se requiere al menos 5V como alimentación de este módulo. También se debe de tener en cuenta la memoria del dispositivo, por lo que se optó por reducir las reglas del control difuso en su implementación a los casos posibles, dejando de lado los casos que no ocurrirán a menos que suceda una alteración con un agente externo como si alguien añadiera vinagre o bicarbonato lo que significaría una alteración no apta para las lechugas y el proceso se detiene en caso de detectar estas anomalías y se le avisa al usuario.

Por otro lado, las pruebas de verificación del sistema estructural donde se alteró la solución nutritiva nos dan como resultado el tiempo que necesita el sistema para restablecer los valores en dicha solución, donde aproximadamente si se tiene una alteración ± 0.5 en el pH esta se resolvería en 30 minutos. Para conductividad no se alteró de forma manual, ya que la conductividad tiene un rango mucho mayor como valor establecido de ± 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por esto se optó por solo alterar el pH, además de que en este sistema son variables dependientes, una cambia respecto a la otra. Este sistema no espera variaciones amplias, ya que los sistemas hidropónicos no tienden a alterar los valores a muy básico o a muy ácido, las alteraciones rondan en valores similares, dependiendo de la cantidad de plantaciones es como se podría alterar en mayor medida, pero los rangos seguirían en valores similares a los deseados.

Para el módulo 5: Comunicación

En este módulo, se tiene la comunicación interna donde alguna alteración con los voltajes de entrada de las señales podría causar errores, por ello se hicieron pruebas de cada módulo que envié datos al M4 para determinar si había algún problema. Para la comunicación externa, como el internet no siempre es tan estable, con la comunicación Ethernet reducimos la pérdida de conexión con la interfaz; e incluso si algo llegara a pasar como que se fuera el internet o alguien desconectara el cable ethernet del módem se indica al usuario que no se pudo conectar con la interfaz mediante un led, esto para evitar que el usuario piense que no se están enviando datos solo porque sí, y pueda observar el led prendido indicándole que hay problemas de conexión. Además, de que, si esto ocurre, el sistema sigue trabajando para evitar que las lechugas sufran alguna pérdida de nutrientes.

Modulo 6: Interfaz

Para la interfaz, se hicieron pruebas de envíos de datos verificando que estos sean recibidos y almacenados en la base de datos para que posteriormente sean mostrados en la interfaz del usuario. Estas pruebas dieron como resultado la recepción correcta de los datos y la base de datos los almacenaba. Esto para que el usuario pueda tener algún registro de lo que ocurre en cada ciclo de las lechugas.

Sistema 4: Estructural

Las pruebas para el funcionamiento de la estructura hidropónica nos dieron como resultado que los tubos, con la inclinación realizada es suficiente para que se vacíen, pero dejando un sobrante en los tubos de al menos 5mm para que las raíces de las lechugas siempre estén en contacto con la solución nutritiva cumpliendo con la función necesaria. Por otro lado, la caja para los componentes electrónicos presentó que la tapa para sacar las pilas para su recarga choca con uno de los canales, sin embargo, ya que estos canales no están fijados, es posible levantar la tapa si se levanta dicho canal. Se propuso dicha ubicación para reducir espacio y que no fuera necesario otro mueble para ponerla y a su vez también sostiene las bombas peristálticas. Se colocaron en dicha posición para evitar que las mangueras se lleguen a doblar y dificulten el paso de los líquidos utilizados.

4.2 Análisis de costos

4.2.1 Costos de componentes con compra en línea

En la Tabla 77 se muestra el desglose de los productos adquiridos en línea. Cabe mencionar que algunos de los productos tuvieron envío gratis mientras que para otros se tuvo que considerar el costo de envío.

Tabla 77 Costo compras en línea

No.	Concepto	Cant.	Precio unitario	Total
1	Sensor CE con soluciones de calibración EC-K1.0	1	\$ 5,148.40	\$5,148.40
2	Sensor pH con soluciones de calibración analog pH kit	1	\$ 2,084.85	\$2,084.85
3	Envío e impuestos aduanales	-	\$ 2,201.33	\$2,201.33
4	Estructura Sistema hidropónico*	1	\$ 2,736.00	\$2,736.00
5	Bomba principal	1	\$ 239.00	\$ 239.00
6	Bomba peristáltica	2	\$ 412.07	\$ 824.14
7	Bomba de oxigenación	1	\$ 160.00	\$ 160.00
8	Envío bomba de oxigenación	-	\$ 99.00	\$ 99.00
9	Sensor de temperatura y humedad DHT11 con cables	1	\$ 131.00	\$ 131.00
10	Sensor de nivel flotado horizontal	3	\$ 57.00	\$ 171.00
11	Modulo DS3231 de tiempo real RTC con batería.	1	\$ 88.00	\$ 88.00
12	Fuente Conmutada 12V 2A	1	\$ 120.00	\$ 120.00
13	Envío de componentes electrónicos (No.9 - No.12)	-	\$ 50.00	\$ 50.00
14	Paquete de pilas recargables Amazon basics	1	\$ 438.26	\$ 438.26
15	Cargador de pilas recargables	1	\$ 270.00	\$ 270.00
			Total	\$ 14,760.98

* Consiste en una estructura base de PVC, 4 Canales de cultivo de PVC, 22 canastillas hidropónicas, cinta para sellar las uniones del sistema, 210 cubos de foami agrícola para germinar, semillas de lechuga y un contenedor de plástico de 50 l.

4.2.2 Costos de componentes con compra presencial

En la Tabla 78 se muestra el desglose de los productos adquiridos de manera presencial. Fue necesario hacer la compra de manera presencial debido a alguna de las siguientes razones, su costo se elevaba en línea; únicamente se requería ese componente; se necesitaba ver las dimensiones del componente o evaluar las opciones de diferentes componente y productos; la tienda no contaba con compra en línea.

Tabla 78 Costo compras presencial

No.	Concepto	Cant.	Precio unitario	Total
1	Clavija	1	\$ 20.00	\$ 20.00
2	Cable #16	4	\$ 18.00	\$ 72.00
3	Arduino-MEGA	1	\$ 329.00	\$ 329.00
4	Regulador de Tensión LM317T	1	\$ 12.50	\$ 12.50
5	Capacitor 10 uf	1	\$ 2.00	\$ 2.00
6	Paquete de resistores 330 Ω	1	\$ 5.00	\$ 5.00
7	Paquete de resistores 220 Ω	1	\$ 5.00	\$ 5.00
8	Paquete de resistores 1 KΩ	1	\$ 5.00	\$ 5.00
9	Jumper macho-macho 10 cm	15	\$ 0.50	\$ 14.50
10	Jumper hembra-macho 10 cm	15	\$ 0.50	\$ 14.50
11	Placa fenólica 5x10	1	\$ 7.50	\$ 7.50
12	Base de 16 pines	1	\$ 2.50	\$ 2.50
13	MOLEX 2 Hembra	3	\$ 2.50	\$ 7.50

14	MOLEX 2 Macho	3	\$ 3.00	\$ 9.00
15	MOLEX 3 Hembra	4	\$ 5.00	\$ 20.00
16	MOLEX 3 Macho	4	\$ 6.00	\$ 24.00
17	MOLEX 6 Macho	3	\$ 12.50	\$ 37.50
18	MOLEX 6 Hembra	3	\$ 13.00	\$ 39.00
19	Placa fenólica perforada de 10.7 cm x 14 cm	1	\$ 89.00	\$ 89.00
20	Rollo de soldadura Steren	1	\$ 89.00	\$ 89.00
21	Cable calibre 22 negro	6	\$ 4.00	\$ 24.00
22	Cable calibre 22 rojo	6	\$ 4.00	\$ 24.00
23	Cable calibre 22 amarillo	3	\$ 4.00	\$ 12.00
24	Cinta de aislar	1	\$ 19.00	\$ 19.00
25	Caja de plástico 38 l	1	\$ 139.00	\$ 139.00
26	Caja de plástico 72 l	1	\$ 149.00	\$ 149.00
27	Porta pilas	1	\$ 29.00	\$ 29.00
28	Relevador de estado sólido SSR-40DA	1	\$ 120.00	\$ 120.00
29	Regulador de tensión Lm2596	1	\$ 51.00	\$ 51.00
30	Tornillos 1/4	2	\$ 10.00	\$ 10.00
31	Bisagras de con sus respectivos tornillos	2	\$ 13.00	\$ 26.00
32	tornillos de plástico, rondanas y tuercas de plástico	15	\$ 5.00	\$ 75.00
33	Mini terminal block	5	\$ 6.50	\$ 32.50
34	Capacitor 1000 uf 50 V	1	\$ 12.00	\$ 12.00
35	Mangueras para pecera de 3mm	5	\$ 8.00	\$ 40.00

36	Conectores para manguera de 3mm	4	\$ 4.00	\$ 16.00
37	Arduino ethernet shield	1	\$ 249.00	\$ 249.00
38	Cable ethernet	1	\$ 199.00	\$ 199.00
39	Contacto sencillo cuadrado	2	\$ 17.00	\$ 17.00
40	Cloruro férrico	1	\$ 39.00	\$ 39.00
41	Acrílico color negro *medidas de la caja	1	\$ 162.00	\$ 162.00
42	Papel couche e impresiones	12	\$ 0.65	\$ 7.80
43	Kola loka	1	\$ 30.00	\$ 30.00
44	Silicon frio	1	\$ 15.00	\$ 15.00
45	Cepillo	1	\$ 57.00	\$ 57.00
			Total	\$ 2,358.80

4.2.3 Costos de impresión 3D y corte láser

Debido a la falta de impresora en 3D y una cortadora láser, las piezas que requirieron dichos procesos se mandaron a elaborar. Los costos se muestran en la Tabla 79.

Tabla 79 Costo corte a láser e impresión 3D

No.	Concepto	Cantidad	Precio unitario	Total
1	Corte laser del chasis para la caja de la electrónica	1	\$ 200.00	\$ 200.00
2	Impresión en 3D del chasis del sensor DHT11	1	\$ 30.00	\$ 30.00
3	Impresión en 3D del soporte para los sensores de CE y pH	1	\$ 180.00	\$ 180.00
			Total	\$ 410.00

4.2.4 Costos de traslados

El equipo se reunió tres veces a la semana durante tres meses para trabajar en los aspectos físicos del proyecto, realizar la adquisición de materiales, componentes o trabajar en alguna actividad relacionada al proyecto. Aproximadamente a la semana un automóvil requería \$ 750.00 MXN (pesos mexicanos) de gasolina. Se acordó tomar turnos por semana por lo que, al mes, a cada automóvil le correspondieron dos semanas.

Tabla 80 Costo por traslados

No.	Concepto	Total
1	Gasolina automóvil 1 durante 3 meses	\$ 4,500.00
2	Gasolina automóvil 2 durante 2 meses	\$ 3,000.00
Total		\$ 7,500.00

4.2.5 Costos por servicios

Tipo de cambio al 19 de diciembre del 2021 20.77 pesos y 84 dolares la suscripción anual en 000webhost

Tabla 81 Costos por servicios

No.	Concepto	Total
1	Costos por servicios de internet mensualmente	\$ 399
2	Costos por servicio de alojamiento web anual	\$ 1744.68
Total		\$ 2143.68

4.2.6 Costos totales

La suma total de los costos de los elementos considerados del presente proyecto es de \$25, 029.78 MXN (pesos mexicanos). Los conceptos se resumen en la Tabla 82.

Tabla 82 Costos totales

No.	Concepto	Total
1	Costo compras en línea	\$ 14,760.98
2	Costo compras presencial	\$ 2,358.80

3	Costo corte a láser e impresión 3D	\$ 410.00
4	Costo por ser servicios de internet y alojamiento	\$ 2143.68
5	Costo por traslados	\$ 7,500.00
	Total	\$ 27173.46

Conclusiones

Conforme al análisis de ingeniería realizado se puede concluir que, aunque presentó algunos fallos en la integración que condujeron a cambios de componentes electrónicos o ajustes en la posición en la estructura, se logró el correcto funcionamiento del sistema planteado. Por esto, se logró diseñar y construir un sistema capaz de monitorear y regular el nivel de pH y conductividad en el depósito de agua de riego del sistema a escala para el cultivo hidropónico de lechugas.

Se construyó el sistema estructural con un diseño tipo cama de 2 niveles con una capacidad de 22 lechugas (correspondiendo así con un 10% de la capacidad de cultivo del Sr Juan Martínez) de dimensiones 1.1 m x 0.45 m x 1.1 m.

Para que el sistema pueda monitorear y regular el pH y la conductividad se desarrolló e implementó un control difuso de tipo Mamdani en el cual se establecieron reglas difusas y funciones de membresía discretas. Éste se implementó en la tarjeta de desarrollo Arduino Mega usando la biblioteca “Embedded Fuzzy Logic Library” teniendo como entradas la información obtenida por los sensores de pH y CE y como salida señales PWM para la regulación de potencia de los actuadores.

Se realizó la correcta selección e implementación de los actuadores que manejan los diferentes líquidos involucrados en el crecimiento de la lechuga hidropónica. Para ello, se seleccionaron bombas peristálticas de 12 V de CD para agregar agua y concentrado de nutrientes a la solución nutritiva gobernadas mediante una señal PWM a través de una etapa de potencia basada en transistores BJT, elementos electrónicos que se integraron al sistema y fueron situados dentro de la caja de protección, misma que fue colocada en la parte inferior de la estructura hidropónica, ubicación que permite reducir espacio y evita la necesidad de otra estructura de soporte. Los componentes que cambiaron de ubicación con respecto al diseño fueron las bombas peristálticas que se colocaron fijas a la parte inferior externa de la caja de protección previniendo que las mangueras se doblen evitando dificultades en el flujo de los líquidos.

Se realizó la integración del módulo de comunicación externa (shield ethernet W5100 y un cable de red hacia el módem de internet) con el módulo de procesamiento. A su vez, se realizaron las etapas de acondicionamiento electrónico para realizar la comunicación interna, cuyos circuitos se conectaron y colocaron dentro de la caja de protección.

Se diseñó una interfaz de usuario siguiendo las etapas de “la guía de diseño centrado en el usuario” hasta la etapa de evaluación de diseño contra requerimientos, descrita por el estándar ISO 13407:1999. Ésta se programó usando HTML, CSS y PHP cuya implementación se llevó a cabo en la versión gratuita del hosting web “000webhost”, a la que se puede acceder mediante cualquier navegador web a través de un enlace.

Se verificó el funcionamiento de cada uno de los módulos mediante las pruebas documentadas a lo largo del Capítulo 3. De estas pruebas se concluye que la bomba para hacer fluir la solución nutritiva a los canales de PVC es capaz de subir una altura de 1.1 m y la estructura mantiene una altura entre 0.5 cm y 2.5 cm de solución nutritiva en los canales de cultivo.

Se realizó la correcta integración de los módulos del sistema. Dicha integración se realizó partiendo de módulos hacia sistemas hasta llegar al sistema 1 (sistema estructural). Se realizó la verificación del sistema completo, durante las pruebas se obtuvo que el sistema es capaz de regular una variación ± 0.5 en el pH en 30 minutos. Además de que la solución nutritiva es más sensible al concentrado de nutrientes que al agua, ya que se requiere mayor cantidad de agua para alterar su valor de pH y conductividad.

Partiendo de lo anterior, se tiene que se cumplió con la totalidad de los objetivos planteados para el presente proyecto.

Recomendaciones y trabajo a futuro

Diseñar y manufacturar en un lugar especializado la placa de circuito impreso de todo el sistema para conjuntar cada uno de los módulos en una sola placa dando mejora a la estabilidad de las señales y permitiendo un mejor flujo de corriente, así como garantizar una correcta conexión entre cada uno de los componentes electrónicos.

Se propone un cambio en el circuito de acondicionamiento energético del módulo de concentración de solución (M2), pues, aunque cumple correctamente con su función, el uso de un circuito con optoacopladores antes de los transistores que controlan la alimentación de las bombas peristálticas podría disminuir el ruido eléctrico en las señales lógicas.

Se recomienda implementar un diseño de página web reactivo con la finalidad de tener una página que sea capaz de adaptarse a cualquier tamaño de pantalla sin perder el formato y la proporción de los elementos que componen a la interfaz gráfica de usuario.

Se propone poder realizar la selección del intervalo deseado para la exportación de datos en un archivo .pdf o un documento Excel a no únicamente por día, ya sea semanal o mensual según el usuario lo requiera, para que este sea capaz de guardar los reportes de mediciones de su interés y hacer estudio de ellos.

Se propone realizar el envío de datos a través de un módulo WiFi, reemplazando el módulo de ethernet, dando solución a un escenario donde no sea posible realizar la conexión por medio de un cable ethernet hacia el modem debido a la localización de la estructura hidropónica dentro del inmueble.

Apéndices

A. Diseño del sistema

A.1 Matriz binaria de criterios

Tabla 83 Matriz binaria

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	Cr11	Cr12	Cr13	Cr14	Cr15	Cr16	Cr17	Cr18	Cr19	Cr20	Cr21	Cr22	Cr23	Cr24	Cr25	Cr26	Total	%		
Cr1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0.034	
Cr2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	23	0.071	
Cr3	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0.034	
Cr4	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	12	0.037		
Cr5	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	14	0.043		
Cr6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	10	0.031		
Cr7	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	17	0.052		
Cr8	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	15	0.046		
Cr9	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	22	0.067		
Cr10	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	21	0.064		
Cr11	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	16	0.049		
Cr12	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	20	0.061		
Cr13	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	19	0.058		
Cr14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	7	0.021		
Cr15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	4	0.012		
Cr16	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	9	0.028		
Cr17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	8	0.025		
Cr18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	24	0.074		
Cr19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	25	0.077		
Cr20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	5	0.015		
Cr21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.003		
Cr22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0.006		
Cr23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0.003		
Cr24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0.006		
Cr25	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	15	0.046		
Cr26	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	12	0.037		
																												Total	326	1.000

B. Diseño de dominio específico (Validación)

B.1 S3 Sistema de información

B.1.1 Validación de componentes

Validación del sensor de CE mediante la implementación de la herramienta multicriterio AHP

Tabla 84 Matriz de criterios sin normalizar

Criterios		Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	Total
Tiempo de vida del sensor	Cr1	1	1/9	1/9	1/5	1/7	1/7	1/6	3	1/4	1/4	5.37
Incluye solución de calibración	Cr2	9	1	1/7	1/7	1/8	1/6	1/4	1/5	1/7	1/7	11.3
Precisión	Cr3	9	7	1	6	2	2	1/2	6	1/4	5	38.8
Condiciones de Operación	Cr4	5	7	1/6	1	1/4	5	4	1/3	1/7	5	27.9
Tiempo de sumersión	Cr5	7	8	1/2	4	1	7	6	5	1/4	2	40.8
Tipo de señal de salida	Cr6	7	6	1/2	1/5	1/7	1	3	1/2	1/4	1/2	19.1
Adaptabilidad	Cr7	6	4	2	1/4	1/6	1/3	1	1/3	3	4	21.1
Costo	Cr8	1/3	5	1/6	3	1/5	2	3	1	1/3	4	19
Temperatura de trabajo.	Cr9	4	7	4	7	4	4	1/3	3	1	5	39.3
Refacción	Cr10	4	7	1/5	1/5	1/2	2	1/4	1/4	1/5	1	15.6
		52.3	52.111	8.79	22	8.53	23.6	18.5	19.6	5.82	26.9	238

Tabla 85 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	Total
Cr1	0.019	0.002	0.013	0.009	0.017	0.006	0.009	0.153	0.043	0.009	0.028
Cr2	0.172	0.019	0.016	0.006	0.015	0.007	0.014	0.010	0.025	0.005	0.029
Cr3	0.172	0.134	0.114	0.273	0.235	0.085	0.027	0.306	0.043	0.186	0.157
Cr4	0.096	0.134	0.019	0.045	0.029	0.211	0.216	0.017	0.025	0.186	0.098
Cr5	0.134	0.154	0.057	0.182	0.117	0.296	0.324	0.255	0.043	0.074	0.164
Cr6	0.134	0.115	0.057	0.009	0.017	0.042	0.162	0.025	0.043	0.019	0.062
Cr7	0.115	0.077	0.228	0.011	0.020	0.014	0.054	0.017	0.516	0.149	0.120
Cr8	0.006	0.096	0.019	0.136	0.023	0.085	0.162	0.051	0.057	0.149	0.078
Cr9	0.076	0.134	0.455	0.318	0.469	0.169	0.018	0.153	0.172	0.186	0.215
Cr10	0.076	0.134	0.023	0.009	0.059	0.085	0.014	0.013	0.034	0.037	0.048
Suma	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tabla 86 AHP Criterio 1

Cr1	S1	S2	
S1	1	1/9	
S2	9	1	
	10	1.11	
Cr1	S1	S2	VP-Cr1
S1	0.10	0.10	0.10
S2	0.90	0.90	0.90

Tabla 89 AHP Criterio 4

Cr4	S1	S2	
S1	1	1/7	
S2	7	1	
	8	1.14	
Cr4	S1	S2	VP-Cr4
S1	0.13	0.13	0.13
S2	0.88	0.88	0.88

Tabla 92 AHP Criterio 7

Cr7	S1	S2	
S1	1	1/3	
S2	3	1	
	4	1.33	
Cr7	S1	S2	VP-Cr7
S1	0.25	0.25	0.25
S2	0.75	0.75	0.75

Tabla 95 AHP Criterio 10

Cr10	S1	S2	
S1	1	1/8	
S2	8	1	
	9	1.13	
Cr10	S1	S2	VP-Cr12
S1	0.11	0.11	0.11
S2	0.89	0.89	0.89

Tabla 87 AHP Criterio 2

Cr2	S1	S2	
S1	1	1	
S2	1	1	
	2	2	
Cr2	S1	S2	VP-Cr2
S1	0.5	0.5	0.5
S2	0.5	0.5	0.5

Tabla 90 AHP Criterio 5

Cr5	S1	S2	
S1	1	1/7	
S2	7	1	
	8	1.14	
Cr5	S1	S2	VP-Cr5
S1	0.13	0.13	0.13
S2	0.88	0.88	0.88

Tabla 93 AHP Criterio 8

Cr8	S1	S2	
S1	1	7	
S2	1/7	1	
	1.14	8	
Cr8	S1	S2	VP-Cr8
S1	0.88	0.88	0.88
S2	0.13	0.13	0.13

Tabla 88 AHP Criterio 3

Cr3	S1	S2	
S1	1	1/3	
S2	3	1	
	4	1.33	
Cr3	S1	S2	VP-Cr3
S1	0.25	0.25	0.25
S2	0.75	0.75	0.75

Tabla 91 AHP Criterio 6

Cr6	S1	S2	
S1	1	1/2	
S2	2	1	
	3	1.5	
Cr6	S1	S2	VP-Cr6
S1	0.33	0.33	0.33
S2	0.67	0.67	0.67

Tabla 94 AHP Criterio 9

Cr9	S1	S2	
S1	1	1/8	
S2	8	1	
	9	1	
		1/8	
Cr9	S1	S2	VP-Cr9
S1	0.11	0.11	0.11
S2	0.89	0.89	0.89

Validación del sensor de pH mediante la implementación de la herramienta multicriterio AHP

Tabla 96 Matriz de criterios sin normalizar

Criterios		Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	Cr11	Total
Tiempo de vida del sensor	Cr1	1	1/9	1/5	1/5	1/7	1/7	1/6	3	3	1/4	8	16.213
Incluye solución de calibración	Cr2	9	1	1/7	1/7	1/8	1/6	1/4	1/5	1/4	1/7	1/2	11.92
Precisión	Cr3	5	7	1	6	1/2	2	1/2	6	5	5	5	43
Condiciones de Operación	Cr4	5	7	1/6	1	1/2	5	4	1/3	6	5	6	40
Tiempo de sumersión	Cr5	7	8	2	4	1	7	6	5	6	2	4	52
Tipo de señal de salida	Cr6	7	6	1/2	1/5	1/7	1	3	1/2	3	1/2	2	23.843
Adaptabilidad	Cr7	6	4	2	1/4	1/6	1/3	1	1/3	3	4	5	26.083
Costo	Cr8	1/3	5	1/6	3	1/5	2	3	1	6	4	5	29.7
Temperatura de trabajo.	Cr9	1/3	4	1/5	1/6	1/6	1/3	1/3	1/6	1	1/4	1/6	7.1167
Refacción	Cr10	4	7	1/5	1/5	1/2	2	1/4	1/4	4	1	4	23.4
Tiempo de respuesta	Cr11	1/8	2	1/5	1/6	1/4	1/2	1/5	1/5	6	1/4	1	10.892
Suma		44.8	51.11	6.78	15.3	3.69	20.5	18.7	17	43.3	22.4	40.6	284.17

Tabla 97 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	Cr11	Total
Cr1	0.0223	0.0022	0.0295	0.0130	0.0387	0.0070	0.0089	0.1766	0.0694	0.0112	0.1967	0.0523
Cr2	0.2009	0.0196	0.0211	0.0093	0.0338	0.0081	0.0134	0.0118	0.0058	0.0064	0.0123	0.0311
Cr3	0.1116	0.1370	0.1476	0.3915	0.1354	0.0977	0.0267	0.3533	0.1156	0.2233	0.1230	0.1693
Cr4	0.1116	0.1370	0.0246	0.0652	0.1354	0.2442	0.2139	0.0196	0.1387	0.2233	0.1475	0.1328
Cr5	0.1563	0.1565	0.2952	0.2610	0.2707	0.3419	0.3209	0.2944	0.1387	0.0893	0.0984	0.2203
Cr6	0.1563	0.1174	0.0738	0.0130	0.0387	0.0488	0.1604	0.0294	0.0694	0.0223	0.0492	0.0708
Cr7	0.1340	0.0783	0.2952	0.0163	0.0451	0.0163	0.0535	0.0196	0.0694	0.1786	0.1230	0.0936
Cr8	0.0074	0.0978	0.0246	0.1957	0.0541	0.0977	0.1604	0.0589	0.1387	0.1786	0.1230	0.1034
Cr9	0.0074	0.0783	0.0295	0.0109	0.0451	0.0163	0.0178	0.0098	0.0231	0.0112	0.0041	0.0230
Cr10	0.0893	0.1370	0.0295	0.0130	0.1354	0.0977	0.0134	0.0147	0.0925	0.0447	0.0984	0.0696
Cr11	0.0028	0.0391	0.0295	0.0109	0.0677	0.0244	0.0107	0.0118	0.1387	0.0112	0.0246	0.0338
Suma	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Tabla 98 AHP Criterio 1

Cr1	S1	S2	S3	S4
S1	1	1	1/5	1/5
S2	1	1	1/5	1/5
S3	5	5	1	1
S4	5	5	1	1
			2	2
	12	12	2/5	2/5

Cr1	S1	S2	S3	S4	VP-Cr1
S1	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
S2	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
S3	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
S4	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42

Tabla 100 AHP Criterio 3

Cr3	S1	S2	S3	S4
S1	1	1	1/3	1
S2	1	1	1/3	1
S3	3	3	1	3
S4	1	1	1/3	1
	6	6	2	6

Cr3	S1	S2	S3	S4	VP-Cr3
S1	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
S2	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
S3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
S4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17

Tabla 102 AHP Criterio 5

Cr5	S1	S2	S3	S4
S1	1	1/8	1/8	1/8
S2	8	1	1	1
S3	8	1	1	1
S4	8	1	1	1
	25	3.125	3.125	3.125

Cr5	S1	S2	S3	S4	VP-Cr9
S1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
S2	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
S3	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
S4	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32

Tabla 99 AHP Criterio 2

Cr2	S1	S2	S3	S4
S1	1	5	1	1
S2	1/5	1	1/5	1/5
S3	1	5	1	1
S4	1	5	1	1
	3.2	16	3.2	3.2

Cr2	S1	S2	S3	S4	VP-Cr2
S1	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
S2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
S3	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
S4	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31

Tabla 101 AHP Criterio 4

Cr4	S1	S2	S3	S4
S1	1	1	1/2	1/2
S2	1	1	1/2	1/2
S3	2	2	1	1
S4	2	2	1	1
	6	6	3	3

Cr4	S1	S2	S3	S4	VP-Cr4
S1	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
S2	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
S3	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
S4	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

Tabla 103 AHP Criterio 6

Cr6	S1	S2	S3	S4
S1	1	1	2	1
S2	1	1	2	1
S3	1/2	1/2	1	1/2
S4	1	1	2	1
	3	3	7	3.5
	1/2	1/2	7	3.5

Cr6	S1	S2	S3	S4	VP-Cr6
S1	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
S2	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
S3	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
S4	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29

Tabla 104 AHP Criterio 7

Cr7	S1	S2	S3	S4
S1	1	1	4	1
S2	1	1	4	1
S3	1/4	1/4	1	1/4
S4	1	1	4	1
	3.25	3.25	13	3.25

Cr7	S1	S2	S3	S4	VP-Cr7
S1	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
S2	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
S3	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
S4	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31

Tabla 106 AHP Criterio 9

Cr9	S1	S2	S3	S4
S1	1	1/2	1/4	1/2
S2	2	1	1/3	1
S3	4	3	1	2
S4	2	1	1/2	1
	9	5	2.083333	4.5

Cr9	S1	S2	S3	S4	VP-Cr9
S1	0.11	0.09	0.12	0.11	0.11
S2	0.22	0.18	0.16	0.22	0.20
S3	0.44	0.55	0.48	0.44	0.48
S4	0.22	0.18	0.24	0.22	0.22

Tabla 108 AHP Criterio 11

Cr11	S1	S2	S3	S4
S1	1	1/4	1/6	1/6
S2	4	1	1/5	1/5
S3	6	5	1	1
S4	6	5	1	1
	17	11.25	2.366667	2.366667

Cr11	S1	S2	S3	S4	VP-Cr12
S1	0.06	0.02	0.07	0.07	0.06
S2	0.24	0.09	0.08	0.08	0.12
S3	0.35	0.44	0.42	0.42	0.41
S4	0.35	0.44	0.42	0.42	0.41

Tabla 105 AHP Criterio 8

Cr8	S1	S2	S3	S4
S1	1	2	9	4
S2	1/2	1	8	3
S3	1/9	1/8	1	1/8
S4	1/4	1/3	8	1
	1.861111	3	26	8.125

Cr8	S1	S2	S3	S4	VP-Cr8
S1	0.54	0.58	0.35	0.49	0.49
S2	0.27	0.29	0.31	0.37	0.31
S3	0.06	0.04	0.04	0.02	0.04
S4	0.13	0.10	0.31	0.12	0.17

Tabla 107 AHP Criterio 10

Cr10	S1	S2	S3	S4
S1	1	1	1/3	1/5
S2	1	1	1/3	1/5
S3	3	3	1	1/3
S4	5	5	3	1
	10	10	4.666667	1.733333

Cr10	S1	S2	S3	S4	VP-Cr10
S1	0.1	0.1	0.07	0.12	0.10
S2	0.1	0.1	0.07	0.12	0.10
S3	0.3	0.3	0.21	0.19	0.25
S4	0.5	0.5	0.64	0.58	0.55

Validación del sensor de temperatura y humedad

Tabla 109 Matriz de criterios sin normalizar

Criterios		Cr1	Cr2	Cr3	Total
Rango de medición	Cr1	1	4	6	11.00
Costo	Cr2	1/4	1	5	6.25
Tensión de alimentación	Cr3	1/6	1/6	1	17.25
		5.1			
		1.42	667	12	34.50

Tabla 110 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	0.71	0.77	0.50	0.66
Cr2	0.18	0.19	0.42	0.26
Cr3	0.12	0.03	0.08	0.08
Suma	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 111 AHP Criterio 1

Cr1	S1	S2	S3
S1	1	1/4	1/4
S2	4	1	1
S3	4	1	1
	9	2 1/4	2 1/4

Tabla 112 AHP Criterio 2

Cr2	S1	S2	S3
S1	1	5	8
S2	1/5	1	5
S3	1/8	1/5	1
	1.325	6 1/5	14

Cr1	S1	S2	S3	VP-Cr1	Ponderación	Cr2	S1	S2	S3	VP-Cr2	Ponderación
S1	0.11	0.11	0.11	0.11	0.073	S1	0.75	0.81	0.57	0.71	0.469
S2	0.44	0.44	0.44	0.44	0.293	S2	0.15	0.16	0.36	0.22	0.147
S3	0.44	0.44	0.44	0.44	0.293	S3	0.09	0.03	0.07	0.07	0.044

Tabla 113 AHP Criterio 3

Cr3	S1	S2	S3		
S1	1	1/2	1		
S2	2	1	2		
S3	1	1/2	1		
	4	2	4		
Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr3	Ponderación
S1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.165
S2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.330
S3	0.25	0.25	0.25	0.25	0.165

Validación del sensor de nivel

Tabla 114 Matriz de criterios sin normalizar

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	1	3	3	7.0
Cr2	1/3	1	1/2	1.8
Cr3	1/3	2	1	8.8
	1.67	6	4.5	17.7

Tabla 115 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	0.6	0.50	0.67	0.59
Cr2	0.2	0.17	0.11	0.16
Cr3	0.2	0.33	0.22	0.25
Suma	1	1	1	1

Tabla 116 AHP Criterio 1

Cr1	S1	S2	S3		
S1	1	1	1/7		
S2	1	1	1/7		
S3	7	7	1		
			1		
	9	9	2/7		
Cr1	S1	S2	S3	VP-Cr1	Ponderación
S1	0.11	0.11	0.11	0.11	0.065
S2	0.11	0.11	0.11	0.11	0.065
S3	0.78	0.78	0.78	0.78	0.458

Tabla 117 AHP Criterio 2

Cr2	S1	S2	S3		
S1	1	1	1/8		
S2	1	1	1/8		
S3	8	8	1		
			1		
	10	10	1/4		
Cr2	S1	S2	S3	VP-Cr2	Ponderación
S1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.059
S2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.059
S3	0.80	0.80	0.80	0.80	0.471

	1.00	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00	1.00	1.00
<i>Tabla 118 AHP Criterio 3</i>										
Cr3	S1	S2	S3							
S1	1	1/5	1/8							
S2	5	1	1/7							
S3	8	7	1							
	14	8 1/5	1 1/4							
Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr3	Ponderación					
S1	0.07	0.02	0.10	0.06	0.038					
S2	0.36	0.12	0.11	0.20	0.116					
S3	0.57	0.85	0.79	0.74	0.435					
	1.00	1.00	1.00	1.00						

Validación del dispositivo RTC

Tabla 119 Matriz de criterios sin normalizar

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	1	1	1	3.0
Cr2	1	1	1	3.0
Cr3	1	1	1	6.0
	1.67	6	4.5	17.7

Tabla 120 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	0.33	0.33	0.33	0.33
Cr2	0.33	0.33	0.33	0.33
Cr3	0.33	0.33	0.33	0.33
Suma	1	1	1	1

Tabla 121 AHP Criterio 1

Cr1	S1	S2	S3	VP-Cr1	Ponderación
S1	1	1	1/2	0.25	0.083
S2	1	1	1/2	0.25	0.083
S3	2	2	1	0.50	0.167
	4	4	2	1.00	1.00

Tabla 122 AHP Criterio 2

Cr2	S1	S2	S3	VP-Cr2	Ponderación
S1	1	4	2	0.57	0.190
S2	1/4	1	1/2	0.14	0.048
S3	1/2	2	1	0.29	0.095
	1.75	7	3 1/2	1.00	1.00

Tabla 123 AHP Criterio 3

Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr3	Ponderación
S1	1	1/2	1/2	0.20	0.067
S2	2	1	1	0.40	0.133
S3	2	1	1	0.40	0.133
	5	2 1/2	2 1/2	1.00	1.00

Validación del módulo de procesamiento

Tabla 124 Matriz de criterios sin normalizar

Criterios	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Total	
disponibilidad de componentes	Cr1	1	3	3	1/2	1/2	8
Costo	Cr2	1/3	1	4.00	3.00	1/5	8.53
Escalabilidad en terminales	Cr3	1/3	1/4	1	1/3	1/3	2.25
Distribución nacional	Cr4	2.00	3	3	1	2	11
Frecuencia de reloj	Cr5	2.00	5	3	1/2	1	11.5
suma		5.67	12.3	14	5.33	4.03	41.28

Tabla 125 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Total
Cr1	0.18	0.24	0.21	0.09	0.12	0.17
Cr2	0.06	0.08	0.29	0.56	0.05	0.21

Cr3	0.06	0.02	0.07	0.06	0.08	0.06
Cr4	0.35	0.24	0.21	0.19	0.50	0.30
Cr5	0.35	0.41	0.21	0.09	0.25	0.26
suma	1	1	1	1	1	1

Tabla 126 AHP Criterio 1

Cr1	M1	M2	M3	M4	M5	VP-Cr1	Ponderar
M1	1	5	5	5	5		
M2	1/5	1	1	1	1		
M3	1/5	1	1	1	1		
M4	1/5	1	1	1	1		
M5	1/5	1	1	1	1		
	1.8	9	9	9	9		
M1	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.098
M2	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.020
M3	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.020
M4	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.020
M5	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.020
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		

Tabla 128 AHP Criterio 3

Cr3	M1	M2	M3	M4	M5	VP-Cr3	Pondera
M1	1	3	1	4	1/5		
M2	1/3	1	1/3	2	1/7		
M3	1	3	1	3	5		
M4	1/4	1/2	1/3	1	1/8		
M5	5	7	5	8	1		
	7.58	14.50	7.67	18	6.47		
M1	0.13	0.21	0.13	0.22	0.03	0.14	0.010
M2	0.04	0.07	0.04	0.11	0.02	0.06	0.004
M3	0.13	0.21	0.13	0.17	0.77	0.28	0.019
M4	0.03	0.03	0.04	0.06	0.02	0.04	0.003
M5	0.66	0.48	0.65	0.44	0.15	0.48	0.032
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		

Tabla 127 AHP Criterio 2

Cr2	M1	M2	M3	M4	M5	VP-Cr2	Ponderar
M1	1	1/3	1/2	1/3	4		
M2	3	1	3	2	5		
M3	2	1/3	1	1/2	4		
M4	3	1/2	2	1	5		
M5	1/4	1/5	1/4	1/5	1		
	9.25	2.37	6.75	4.03	19		
M1	0.11	0.14	0.07	0.08	0.21	0.12	0.027
M2	0.32	0.42	0.44	0.50	0.26	0.39	0.084
M3	0.22	0.14	0.15	0.12	0.21	0.17	0.036
M4	0.32	0.21	0.30	0.25	0.26	0.27	0.058
M5	0.03	0.08	0.04	0.05	0.05	0.05	0.011
	1	1	1	1	1		

Tabla 129 AHP Criterio 4

Cr4	M1	M2	M3	M4	M5	VP-Cr4	Ponderar
M1	1	1	2	2	8		
M2	1	1	2	2	8		
M3	1/2	1/2	1	1	7		
M4	1/2	1/2	1	1	7		
M5	1/8	1/8	1/7	1/7	1		
	3.13	3.13	6.14	6.14	31		
M1	0.32	0.32	0.33	0.33	0.26	0.31	0.093
M2	0.32	0.32	0.33	0.33	0.26	0.31	0.093
M3	0.16	0.16	0.16	0.16	0.23	0.17	0.053
M4	0.16	0.16	0.16	0.16	0.23	0.17	0.053
M5	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.010
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		

B.1.2 Reglas difusas

En este anexo se escriben las reglas utilizadas para la simulación del control difuso:

1. 1. SI 'pH' ES 'MB 14 a 11' Y 'ErrorCE' ES 'EGC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Mucho fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Mucho fluido'
2. 2. SI 'pH' ES 'MB 14 a 11' Y 'ErrorCE' ES 'EMC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Fluye' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Mas fluido'
3. 3. SI 'pH' ES 'MB 14 a 11' Y 'ErrorCE' ES 'CE Lechuga' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Mas fluido'
4. 4. SI 'pH' ES 'MB 14 a 11' Y 'ErrorCE' ES 'EMPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Mas fluido'
5. 5. SI 'pH' ES 'MB 14 a 11' Y 'ErrorCE' ES 'EGPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Mucho fluido'
6. 6. SI 'pH' ES 'B 10 a 7' Y 'ErrorCE' ES 'EGC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Mas fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Fluye'
7. 7. SI 'pH' ES 'B 10 a 7' Y 'ErrorCE' ES 'EMC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Fluye' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Fluye'
8. 8. SI 'pH' ES 'B 10 a 7' Y 'ErrorCE' ES 'CE Lechuga' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Poco fluido'
9. 9. SI 'pH' ES 'B 10 a 7' Y 'ErrorCE' ES 'EMPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Fluye'
10. 10. SI 'pH' ES 'B 10 a 7' Y 'ErrorCE' ES 'EGPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Mas fluido'
11. 11. SI 'pH' ES 'Lechuga 6.5 a 6' Y 'ErrorCE' ES 'EGC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Mas fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
12. 12. SI 'pH' ES 'Lechuga 6.5 a 6' Y 'ErrorCE' ES 'EMC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Fluye' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
13. 13. SI 'pH' ES 'Lechuga 6.5 a 6' Y 'ErrorCE' ES 'CE Lechuga' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
14. 14. SI 'pH' ES 'Lechuga 6.5 a 6' Y 'ErrorCE' ES 'EMPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Poco fluido'
15. 15. SI 'pH' ES 'Lechuga 6.5 a 6' Y 'ErrorCE' ES 'EGPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Nada Fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Fluye'
16. 16. SI 'pH' ES 'A 6 al 3' Y 'ErrorCE' ES 'EGC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Mas fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
17. 17. SI 'pH' ES 'A 6 al 3' Y 'ErrorCE' ES 'EMC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Fluye' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
18. 18. SI 'pH' ES 'A 6 al 3' Y 'ErrorCE' ES 'CE Lechuga' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Poco fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
19. 19. SI 'pH' ES 'A 6 al 3' Y 'ErrorCE' ES 'EMPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Poco fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Poco fluido'
20. 20. SI 'pH' ES 'A 6 al 3' Y 'ErrorCE' ES 'EGPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Poco fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Fluye'
21. 21. SI 'pH' ES 'MA 3 a 0' Y 'ErrorCE' ES 'EGC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Mucho fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'

22. 22. SI 'pH' ES 'MA 3 a 0' Y 'ErrorCE' ES 'EMC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Mas fluido' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
23. 23. SI 'pH' ES 'MA 3 a 0' Y 'ErrorCE' ES 'CE Lechuga' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Fluye' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Nada fluido'
24. 24. SI 'pH' ES 'MA 3 a 0' Y 'ErrorCE' ES 'EMPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Fluye' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Poco fluido'
25. 25. SI 'pH' ES 'MA 3 a 0' Y 'ErrorCE' ES 'EGPC' ENTONCES 'Bomba Agua' ES 'Fluye' TAMBIÉN 'Bomba Nutrientes' ES 'Fluye'

B.2 S4 Sistema Estructural

Validación de la selección del material de la estructura hidropónica

Tabla 130 Matriz de criterios sin normalizar

Criterios		Cr1	Cr2	Total
Elementos de ensamblaje	Cr1	1	3	4
Costo	Cr2	1/3	1	1.33
Suma		0.7	3.25	5.33

Tabla 131 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Total
Cr1	0.75	0.75	0.75
Cr2	0.25	0.25	0.25
Suma	1	1	1

Tabla 132 AHP criterio 1

Cr1	M1	M2	M3	M4	
M1	1	1	9	9	
M2	1	1	9	9	
M3	1/9	1/9	1	1	
M4	1/9	1/9	1	1	
	2.22	2.22	20	20	
Cr1	M1	M2	M3	M4	VP-Cr1
M1	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
M2	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
M3	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
M4	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	1.00	1.00	1.00	1.00	

Tabla 133 AHP criterio 2

Cr2	M1	M2	M3	M4	
M1	1	2	7	5	
M2	1/2	1	6	4	
M3	1/7	1/6	1	1/2	
M4	1/5	1/4	2	1	
	1.84	3.41	16	10.5	
Cr2	M1	M2	M3	M4	VP-Cr2
M1	0.45	0.90	0.35	0.25	0.49
M2	0.23	0.45	0.30	0.2	0.29
M3	0.06	0.08	0.05	0.03	0.05
M4	0.09	0.11	0.10	0.05	0.09
	0.83	1.54	0.80	0.53	

Validación de la selección del material de la caja de control.

Tabla 134 Matriz de criterios sin normalizar

Criterios		Cr1	Cr2	Cr3	Total
Herramienta de maquinado	Cr1	1	4	3	8.0
Disponibilidad	Cr2	1/4	1	2	3.3
Costo	Cr3	1/3	1/2	1	1.8
Suma		1.6	5.5	6	13.1

Tabla 135 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3
Cr1	0.63	0.73	0.50
Cr2	0.16	0.18	0.33
Cr3	0.21	0.09	0.17
	1	1	1

Tabla 136 AHP criterio 1

Cr1	M1	M2	M3	M4	
M1	1	1/2	3	6	
M2	2	1	3	6	
M3	1/3	1/3	1	1/2	
M4	1/6	1/6	2	1	
	3.5	2	9	13.5	
Cr1	M1	M2	M3	M4	VP-Cr1
M1	0.29	0.25	0.33	0.44	0.33
M2	0.57	0.50	0.33	0.44	0.46
M3	0.10	0.17	0.11	0.04	0.10
M4	0.05	0.08	0.22	0.07	0.11

Tabla 137 AHP criterio 2

Cr2	M1	M2	M3	M4	
M1	1	1	6	1	
M2	1	1	3	1	
M3	1/6	1/3	1	1/2	
M4	1	1	2	1	
	3.17	3.33	12	3.5	
Cr2	M1	M2	M3	M4	VP-Cr2
M1	0.32	0.30	0.50	0.29	0.35
M2	0.32	0.30	0.25	0.29	0.29
M3	0.05	0.10	0.08	0.14	0.09
M4	0.32	0.30	0.17	0.29	0.27

Tabla 138 AHP criterio 3

Cr3	M1	M2	M3	M4	
M1	1	4	5	3	
M2	1/4	1	3	2	
M3	1/5	3	1	2	
M4	1/3	1/2	1/2	1	
	1.78	8.5	9.5	8	
Cr3	M1	M2	M3	M4	VP-Cr2
M1	0.56	0.47	0.53	0.375	0.48
M2	0.14	0.12	0.32	0.25	0.21
M3	0.11	0.35	0.11	0.25	0.21
M4	0.19	0.06	0.05	0.125	0.11

B.3 S1 Sistema de manejo de solución

Validación de actuadores (bombas secundarias)

Tabla 139 Matriz de criterios sin normalizar

Criterios	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Total	%
Control por PWM	1	1/4	6.00	3.00	10.3	0.4
Caudal	4.00	1	3.00	3.00	11.0	0.4
Costo	1/6	1/3	1	1/4	1.8	0.1
Disponibilidad	1/3	1/3	4.00	1	5.7	0.2
	5.5	1.9	14	7.25	28.7	1

Tabla 140 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Total
Cr1	0.18	0.13	0.43	0.41	0.25
Cr2	0.73	0.52	0.21	0.41	0.49
Cr3	0.03	0.17	0.07	0.03	0.09
Cr4	0.06	0.17	0.29	0.14	0.17
Suma	1	1	1	1	1

Tabla 141 AHP Criterio 2

Cr2	S1	S2	S3		
S1	1	3	1		
S2	1/3	1	1/3		
S3	1	3	1		
	2.333	7	2.333		
Cr2	S1	S2	S3	VP-Cr2	P
S1	0.43	0.43	0.43	0.43	0.209
S2	0.14	0.14	0.14	0.14	0.070
S3	0.43	0.43	0.43	0.43	0.209
	1.00	1.00	1.00	1.00	

Tabla 142 AHP Criterio 4

Cr4	S1	S2	S3		
S1	1	1.00	4		
S2	1.00	1	4		
S3	1/4	1/4	1		
	2.25	2.25	9		
Cr4	S1	S2	S3	VP-Cr4	P
S1	0.44	4/9	0.44	0.44	0.110
S2	0.44	4/9	0.44	0.44	0.110
S3	0.11	1/9	0.11	0.11	0.027
	1.00	1.00	1.00	1.00	

Tabla 143 AHP Criterio 1

Cr1	S1	S2	S3		
S1	1	1	5		
S2	1	1	5		
S3	1/5	1/5	1		
	2.2	2 1/5	11		
Cr1	S1	S2	S3	VP-Cr1	P
S1	0.45	0.45	0.45	0.45	0.112
S2	0.45	0.45	0.45	0.45	0.112
S3	0.09	0.09	0.09	0.09	0.022
	1.00	1.00	1.00	1.00	

Tabla 144 AHP Criterio 3

Cr3	S1	S2	S3		
S1	1	2.00	1		
S2	1/2	1	1/2		
S3	1.00	2.00	1		
	2.5	5.00	2 1/2		
Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr3	P
S1	0.40	0.40	0.40	0.40	0.037
S2	0.20	0.20	0.20	0.20	0.018
S3	0.40	0.40	0.40	0.40	0.037
	1.00	1.00	1.00	1.00	

Validación de actuador (bomba de oxigenación)

Tabla 145 Matriz de criterios sin normalizar

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	1	1/2	2	3.5
Cr2	2	1	2	5.0
Cr3	1/2	1/2	1	8.5
	3.5	2	5	17.0

Tabla 146 Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	0.29	0.25	0.40	0.31
Cr2	0.57	0.50	0.40	0.49
Cr3	0.14	0.25	0.20	0.20
Suma	1	1	1	1

Tabla 147 AHP Criterio 2

Cr2	S1	S2	S3	VP-Cr1	Ponderación
S1	1	1/3	2		
S2	3	1	4		
S3	1/2	1/4	1		
	4.5	1	7		
		4/7			
S1	0.22	0.21	0.29	0.24	0.117
S2	0.67	0.63	0.57	0.62	0.306
S3	0.11	0.16	0.14	0.14	0.067
	1.00	1.00	1.00	1.00	

Tabla 148 AHP Criterio 3

Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr3	Ponderación
S1	1	1/2	1/2		
S2	2	1	1		
S3	2	1	1		
	5	2	2		
		1/2	1/2		
S1	0.20	0.20	0.20	0.20	0.098
S2	0.40	0.40	0.40	0.40	0.196
S3	0.40	0.40	0.40	0.40	0.196
	1.00	1.00	1.00	1.00	

Tabla 149 AHP Criterio 1

Cr1	S1	S2	S3	VP-Cr2	Ponderación
S1	1	2	4		
S2	1/2	1	2		
S3	1/4	1/2	1		
	1.75	3 1/2	7		
S1	0.57	0.57	0.57	0.57	0.280
S2	0.29	0.29	0.29	0.29	0.140
S3	0.14	0.14	0.14	0.14	0.070
	1.00	1.00	1.00	1.00	

B.4 S1 Sistema Energético

Validación de la fuente de 12 V

Tabla 150 Matriz de criterios sin normalizar

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	1	2	2	5.0
Cr2	1/2	1	2	3.5
Cr3	1/2	1/2	1	8.5
	1.67	6	4.5	17.0

Matriz de criterios normalizada

	Cr1	Cr2	Cr3	Total
Cr1	0.50	0.57	0.40	0.49
Cr2	0.25	0.29	0.40	0.31
Cr3	0.25	0.14	0.20	0.20
Suma	1	1	1	1

AHP Criterio 1						AHP Criterio 2					
Cr1	S1	S2	S3	VP-Cr1	Ponderación	Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr3	Ponderación
S1	1	1	2	0.40	0.196	S1	1	1/2	2	0.29	0.062
S2	1	1	2	0.40	0.196	S2	2	1	2	0.57	0.097
S3	1/2	1/2	1	0.20	0.098	S3	1/2	1/2	1	0.14	0.039
	2.5	2 1/2	5	1.00	1.00		3.5	2	5	1.00	1.00
Cr1	S1	S2	S3	VP-Cr1	Ponderación	Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr3	Ponderación
S1	0.40	0.40	0.40	0.40	0.196	S1	0.29	0.25	0.40	0.31	0.062
S2	0.40	0.40	0.40	0.40	0.196	S2	0.57	0.50	0.40	0.49	0.097
S3	0.20	0.20	0.20	0.20	0.098	S3	0.14	0.25	0.20	0.20	0.039
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AHP Criterio 3											
Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr2	Ponderación						
S1	1	1/2	2								
S2	2	1	2								
S3	1/2	1/2	1								
	3.5	2	5								
Cr3	S1	S2	S3	VP-Cr2	Ponderación						

S1	0.29	0.25	0.40	0.31	0.097
S2	0.57	0.50	0.40	0.49	0.153
S3	0.14	0.25	0.20	0.20	0.062
	1.00	1.00	1.00	1.00	

B.5 Características de las propuestas de solución

Tabla 151 Características de las bombas de aire consideradas

Bomba de aire	Ocean Aqua OC-05 (S1)	Aquakril 4261 (S2)	TEEMO (S3)
Potencia	2W	3 W	2,5 W
Salida manguera	Piedra Y Manguera	Incluye 1m manguera y 1 difusor	Ajustable, incluye tubo de aire, difusor, Válvula de retención Ventosa de fijación
Volumen indicado	10-80 Litros	(a 100) L	(40 a 120)L
Caudal máx	1.2 L/min	2 l/min	1,8 l/min
Precio (Sin envío)	105	117-190	311

B.6 Análisis de elemento finito

Para este elemento se consideró una carga distribuida en la superior de cada uno de los círculos, ya que es donde se colocarán las sondas y en donde recae el peso de éstas. El peso de cada sonda es de 49gr. Los parámetros considerados para el análisis y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 152 y en la Figura 116, respectivamente.

Tabla 152 Análisis y resultados del soporte de sondas pH y CE

Condiciones iniciales	
Geometría fija	Cara superior de la curvatura
Cargas (1kgf = 9.81N)	F1 = 0.049 kgf F2 =0.049 kgf
Material	Polycarbonato de Alta viscosidad (PC)
Resultados	
Esfuerzo máximo de Von Mises	$2.544 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
Desplazamiento máximo	$9.281 \times 10^{-3} \text{ mm}$
deformación unitaria máxima	7.133×10^{-5}

Nombre del modelo: Dual_probe_holderModificado
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Default-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 1

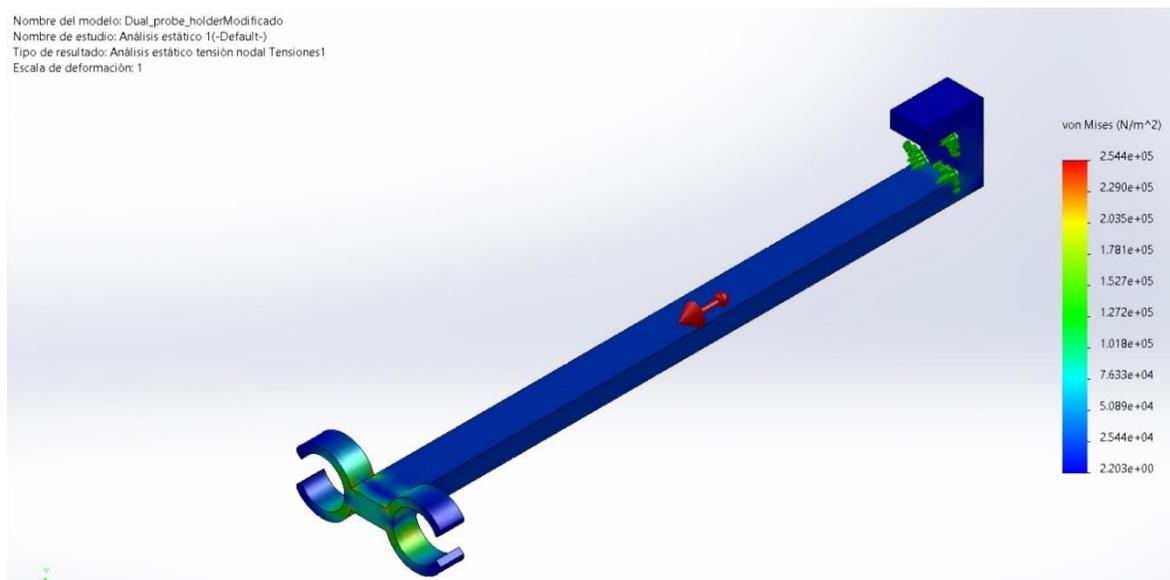


Figura 116 Análisis de tensiones de Von Mises del soporte de sondas pH y CE

En la Figura 116 se muestra el resultado del análisis para tensiones de Von Mises, en esta figura se alcanza a apreciar pequeños puntos de color rojo justamente en la unión entre los círculos y la estructura rectangular lo que representaría el criterio de falla escalar de Von Mises. La mayoría de la pieza está en color azul por lo que no habría riesgo de falla severo.

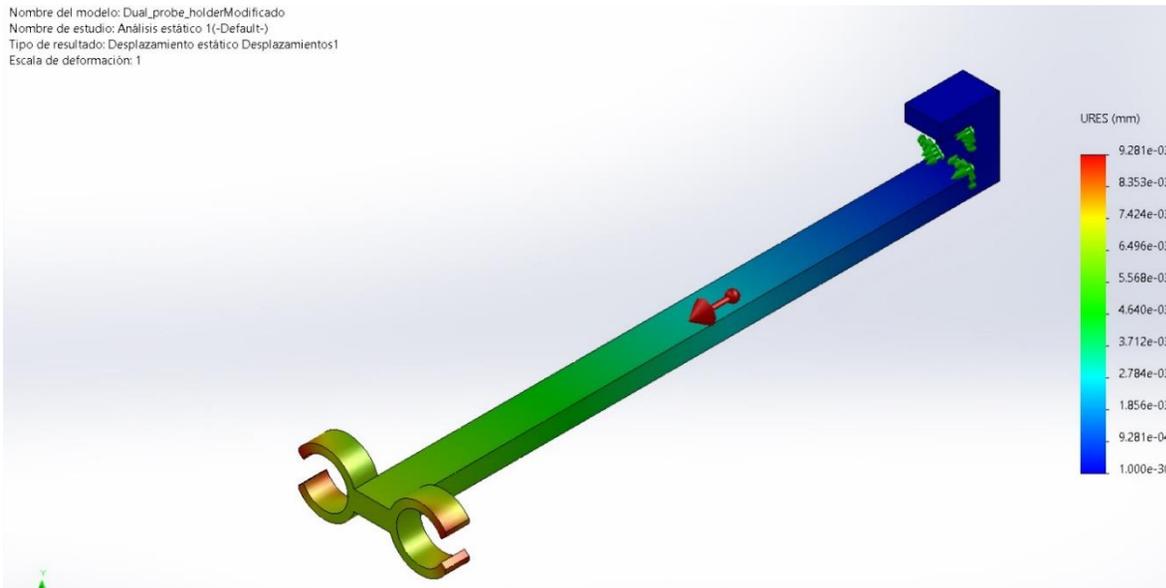


Figura 117 Análisis de desplazamiento del soporte de sondas pH y CE

En la Figura 117 se muestra el desplazamiento que sufre la pieza. El mayor riesgo de desplazamiento y que posteriormente ocurra una ruptura es en las puntas donde se abre el círculo para poder meter las sondas. Al checar la escala, la zona roja equivale a 9.81×10^{-3} mm lo cual marca un desplazamiento mínimo de la pieza. La parte de arriba que es la que sujeta como tal todo el soporte al contenedor está en color azul que significa que no hay un desplazamiento significativo.

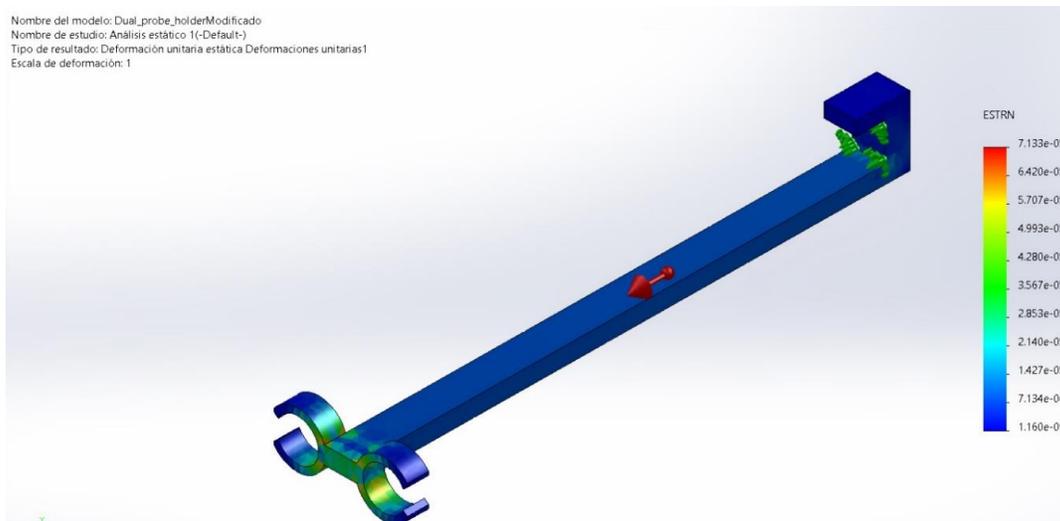


Figura 118 Análisis de deformaciones del soporte de sondas pH y CE

En la Figura 118 se muestra la deformación unitaria que sufre la pieza donde los puntos críticos son nuevamente la unión entre los círculos y la estructura rectangular. Donde esa unión es la que presenta mayor deformación, pero aun así la deformación máxima que sufre es de 7.133×10^{-5} y casi toda la pieza está en azul por lo que la deformación unitaria es muy pequeña.

B.7 Diagramas de flujo del código

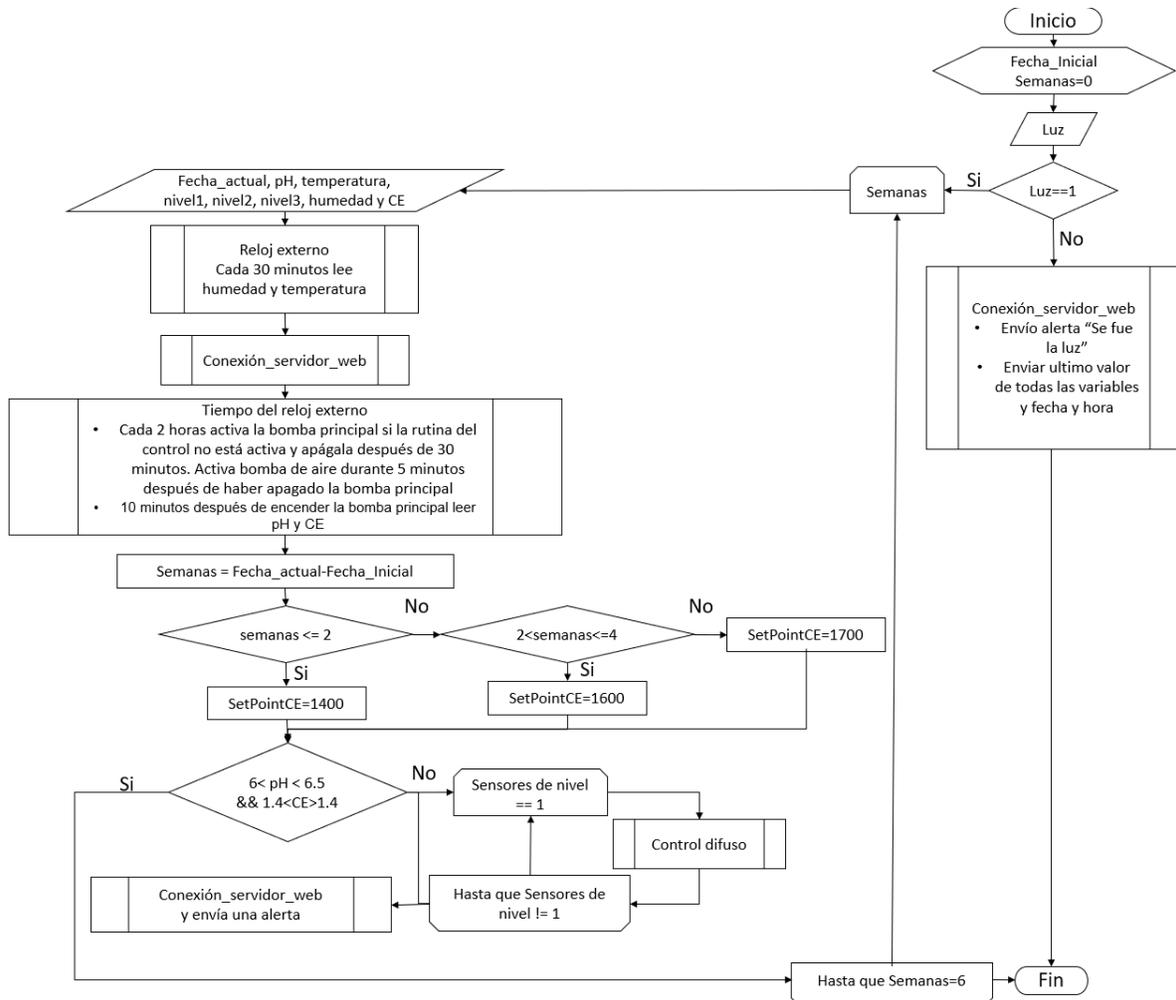


Figura 119 Diagrama de flujo principal

En la Figura 119 se encuentra el diagrama de flujo principal en el cual se plasma la representación del pseudocódigo del proceso principal. Se inicia el programa, se obtiene la fecha de inicio de la producción, el contador de semanas empieza en 0 y se obtiene el valor de la variable Luz, la cual es un pin digital que puede valer 0 o 1. Si luz es igual a 1 y mientras el contador de semanas se mantenga menor a 6 se realiza el resto de las instrucciones, se lee la fecha actual, se leen todos los sensores para posteriormente que el reloj externo nos indique que es lo que se tiene que hacer, cada 30 minutos enviar los datos de humedad y temperatura a la interfaz de usuario y cada 2 horas prender la bomba principal y apagarla después de 30 minutos, inmediatamente después de apagarla se prende la bomba de aire por 5 minutos para oxigenar la solución nutritiva y posteriormente se realizan las mediciones de pH y CE, se actualiza el contador de semanas, se obtiene el valor de SetPointCE de acuerdo a la cantidad de semanas que hayan transcurrido y se verifica si el pH y la CE están dentro de los rangos, en caso de que no estén en los rangos también se verifican que los sensores de nivel estén en 1 para proceder a realizar el

control, si alguno está en 0 significa que el usuario debe de rellenar alguno de los contenedores por lo que se envía una alerta a la interfaz web. Una vez que los valores de pH y CE estén en los rangos se repite todo lo que está en el bucle, siempre y cuando Luz sea 1.

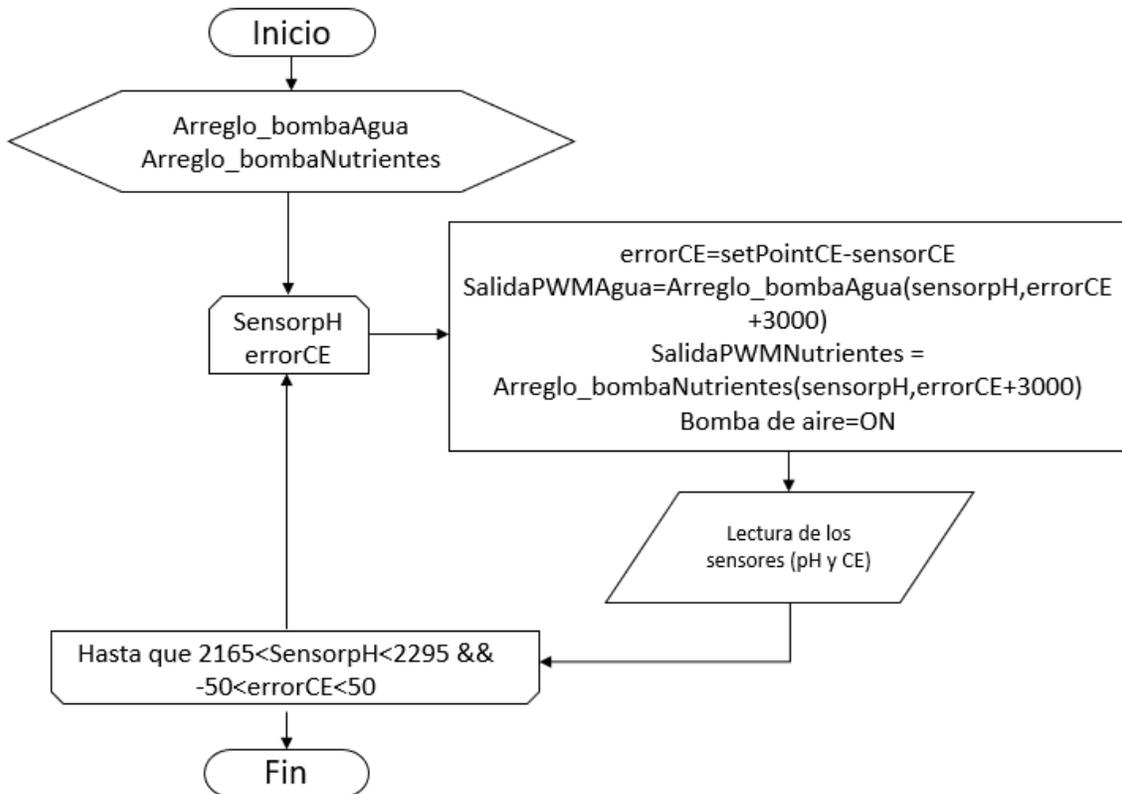


Figura 120 Diagrama de flujo de la subrutina de control difuso

En la Figura 120 se representa el diagrama de flujo del proceso Control_difuso el cual consiste en que inicia el proceso con los arreglos de los valores de salida para la bomba de agua y de nutrientes, mientras el valor de pH y CE no estén en los rangos se realizará el error de CE y se identificará que es lo que el sistema debe de realizar de acuerdo con la posición que se le indique a cada arreglo. Además de prender la bomba de aire para mantener la solución oxigenada y mezclada. La lectura de los sensores de pH y CE es constante hasta que estos lleguen al rango de valores deseados.

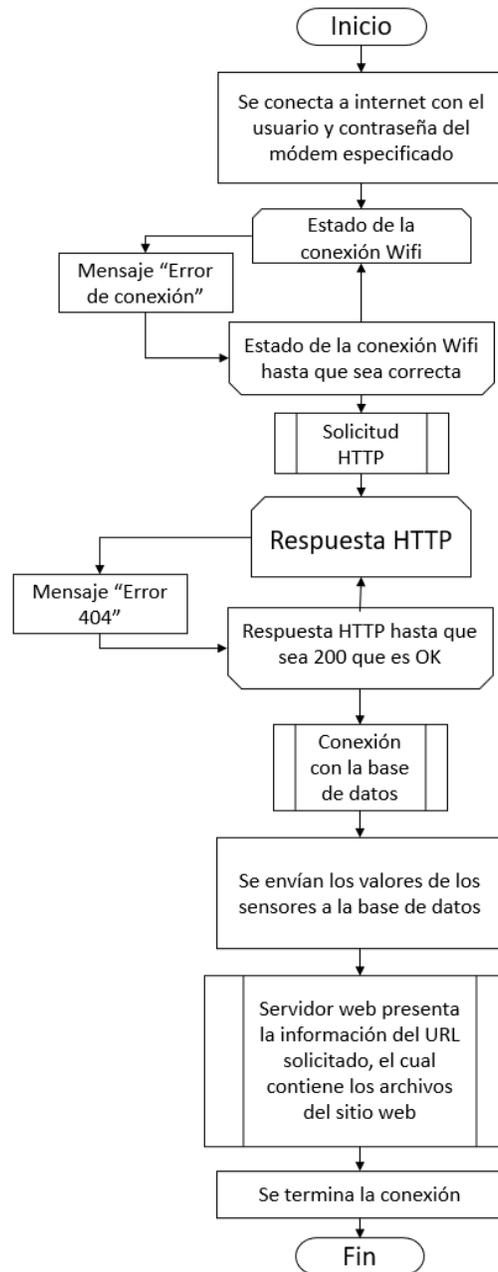


Figura 121 Diagrama de flujo de la subrutina para realizar la comunicación entre el microcontrolador y el servidor web (interfaz)

En la Figura 121 se presenta el diagrama de flujo del proceso Conexión_Servidor_web el cual plasma los pasos que realiza el microcontrolador para conectarse a internet, primero se declara el SSID y contraseña del módem del usuario, si todo es correcto se realizará la solicitud HTTP y se obtendrá una respuesta ya sea un error si el URL no está disponible o se conectará con el servidor web deseado y al cual se le envía los valores de los sensores que se deseen actualizar y se terminará la conexión.

B.8 Características de los componentes utilizados

Tabla 153 Características de las bombas peristálticas consideradas

Características	Bomba Dosificadora Profesional (Bomba Peristáltica)	Bomba Peristáltica De Alto Flujo Bomba Dosificadora En Minia	Mini bomba de diafragma
Tensión de alimentación	-	12V corriente continua	12 V
Corriente de operación	80mA	-	0.4 A
Flujo	0 a 200ml/min	60 a 150 ml/min	200 mL/min
Costo	\$309.70	\$325.65	\$305

Tabla 154 Características de los sensores de conductividad eléctrica considerados

Características	Gravity: DFR0300	Atlas Scientific: #ENV-40-EC-K1.0
Rango de medición	0~20,000 $\mu\text{S/cm}$	5 ~ 200,000 $\mu\text{S/cm}$
Tensión de salida	Señal de salida analógica 0~3.4V	Señal de salida digital 0~5V
Precisión	+/- 5%	+/- 2%
Tensión de alimentación	3.0~5.0V	3.3~5.0 V
Rango de Temperatura	0- 40 °C	1 – 110 °C
Condiciones de operación	Operación discontinua	Operación continua
Tiempo de vida	>0.5 años	~10 años
Incluye sol de calibración	si	si
Costo	\$1,783.00	\$5,502.00

Tabla 155 Características de los sensores de potencial de hidrógeno considerados

Características	Gravity: SEN0161-V2	Gravity pro v2:	Atlas Scientific:	Atlas Scientific:
Rango de medición	0~14	0~14	0 – 14	2 – 13
Tensión de salida	Señal de salida analógica 0~3.0V	Señal de salida analógica 0~3.0V	Señal de salida digital 0~5V	Señal de salida analógica 0.265~3.0V
Precisión	±0.1 @25°C	±0.1 @25°C	+/- 0.002 @25°C	+/- 0.1 @25°C
Resolución	-	-	+/- 0.001	+/- 0.1
Tiempo de respuesta	<2min	<1min	95% in 1s	95% in 4s
Tensión de alimentación	3.3~5.5V	3.3~5.5V	3.3~5.0 V	3.3~5.0 V
Rango de Temperatura	5~60°C	0~60°C	-5 – 99 °C	1 – 60 °C
Condiciones de operación	Discontinua	Discontinua	Continua	Continua
Tiempo de vida	>0.5 años	7*24horas >0.5	~1 Year	~1 Year
Costo	\$1,144.50	\$1,677.9	\$4221.00	\$2352.00
Incluye solución de calibración	Si	No	Si	Si

Tabla 156 Características de los sensores de humedad y temperatura considerados

Características	DHT11 (S1)	DHT22 (S2)	CQRobot Ocean (S3)
Rango de medición	20-90%RH 0 a 50 °C	0-100%RH -40 a 125 °C	0% RH a 100%RH -40-125 °C

Precisión en Temperatura	±2°C	±0.5 °C	±0.2 °C
Precisión en Humedad	±5%RH	±2-5%RH	±2%RH
Resolución	1%RH 1°C 8 bits	0.1%RH 0.1°C 16 bits	0.01%RH 0.015 °C
Velocidad de muestreo	>=1 s	>=2 s	Rápida respuesta >2s
Tensión de alimentación	3-5.5 V	3.3-6V	2.15V a 5.5V
Proceso de comunicación	Interfaz serial, bus único	Señal digital a partir de bus único	I2C
Consumo de corriente en medición	0.5mA - 2.5mA	1 mA-2.5 mA	Menos de 1.5mA 800 a 1500 mA
Tecnología del sensor de temperatura	Termistor	Termistor	-
Tecnología del sensor de humedad	Sensor Capacitivo	Sensor Capacitivo	Sensor Capacitivo
Costo	\$ 45	\$160	\$265.50

Tabla 157 Características de los sensores de nivel considerados.

Características	Ocean, no contact water level sensor (S1)	Ocean contact water level sensor (S2)	Sensor de nivel flotador Horizontal (S3)
Material (en caso de contacto)	-	-	Polímero y Polipropileno
Rango de medición	Grosor del recipiente 0 a 13mm	-	10 mm
Tensión de salida	Nivel alto 3.3 – 5V Nivel bajo 0V	Nivel alto 3.3 – 5V Nivel bajo 0V	0-100 VDC
Tensión de alimentación	5V	5V	0-100 V

Corriente de operación	1mA a 50mA	12mA	0.5 A
Tecnología del sensor	Capacitivo	Optoelectrónico	Interruptor
Costo	\$230	\$160	\$38

Tabla 158 Características de los relojes externos considerados.

Reloj externo	DS1302	DS1307	DS3231
		Fecha y hora, config hasta año bisiesto	Fecha y hora, config hasta año bisiesto
Interfaz de comunicación	I2C	I2C	I2C (PUEDE SER USADO EN CASCADA CON OTRO DISPOSITIVO I2C)
Terminales De comunicación	DAT(I/O) CLK(SCLK) RST(CE)	SDA SCL (SQ) (extra si se quiere un pulso cada segundo)	SDA SCL (SQ) (extra si se quiere un pulso cada segundo)
Tipo de batería	CR2032 de litio	CR2032	CR2032 CR2025
Memoria	31*8 battery backend general-propose	EEPROM AT24C32	EEPROM
Error			+ - 2 ppm(unos minutos al año)
Hojas de especificaciones y tutoriales disponibles	Si, Algunos	Si, Varios, parece una versión austera del 3231	Si, El más popular en ytb
Nota			Con batería 2 time of day alarms Sensor de temp digital
Precio	36	23	68

Tabla 159 Características de las tarjetas de desarrollo consideradas

Requerimientos físicos de comunicación	Requeridos	Arduino Uno R3/nano V3.0		WemosD1 R32 ESP32	Wemos D1 WiFi ESP8266 (ESP-12F)	Tiva C 123G
MCU (Microcontroller unit)	-	ATmega328P		ESP WROOM-32	ESP8266	Tiva C Series TM4C123GH6
UART	Sensor CE Com Interfaz	1		1	1	8
SPI	Reloj ext	MISO MOSI SCK SS	MISO MOSI	MISO MOSI SCK SS	1	4
I2C	Sensor CE Reloj ext	1		1	Por software todas las terminales digitales	6
WIFI	Com Interfaz	-		Protocolos: 802.11 b/g/n (802.11n hasta 150 Mbps) Rango de frecuencia: 2.4 GHz ~ 2.5 GHz	ESP-12F API para Wifi compatible con el Shield Wifi Arduino Rango de frecuencia: 2.4 GHz ~ 2.5 GHz	-
Entradas analógicas	Sensor pH 3v	6 (10 bits)	8 (10 bits)	6 (12 bits)	1 (3V)	12 (12 bits)
Terminales digitales	5	14 (6 para PWM)	22 (6 para PWM)	20	11	35
PWM	2 (8 bits)	6 (8 bits)		6	11	16 (16 bits)
Frecuencia de reloj	-	16 MHz		80/240 Mhz	80/160Mhz	80/120 MHz
Mem Flash	-	32 KB bootloader 2kb/0.5kb		4Mbytes	4Mbytes	256 KB
Tamaño PCB	-	53.4 x68.6 mm	18x45 mm	54x68 mm	54 x68 mm	57.15x108 mm
Peso	-	80 g	18.50 g	80/100 g	80 g	116 g
Detalles:	-	CD por pines de E/S 20 mA	Corriente máx por c/pin	Todas las terminales trabaja a 3.3 V	Todas las terminales trabaja a 3.3 V	3.3 VDC (300 mA máx.)

		CD por pines de 3.3 V 50 mA	de E/S 40 mA			5.0 VDC (depende del uso del 3.3 VDC, 23 mA a 323 mA) 3.3V Señales, 5V Tolerancia
Disponibilidad	-	CDMX (Mercado libre)		Unit electrónica	Unit electrónica	Extranjero
Precio	-	Genérico.		\$141	\$ 110	Sin envío
		\$160	\$96			\$286
Compatible con IDE arduino		Totalmente		Aparentemente es compatible con muchas de sus librerías	Aparentemente es compatible con muchas de sus librerías	No compatible IDE Energía o Code Composer Studio (CCS) Tiene sus propios módulos funcionales tipo plug-in (BoosterPacks)

Tabla 160 Características de las fuentes de alimentación consideradas

Características	Fuente conmutada de 12 V a 3 A	Fuente conmutada de 12 V a 2 A	Fuente conmutada de 12 V a 4.2 A
Voltaje de entrada	AC110-220V ±15% 50/60Hz	AC110-220V 50/60Hz	100~240VAC 47~63HZ
Potencia máx salida	36W	24W	50.4W
Elementos de protección	cortocircuito / sobrecarga / sobretensión	cortocircuito / sobrecarga / sobretensión	cortocircuito / sobrecarga
Temp. de trabajo	-10 ~ + 50 °C	-10 ~ + 50 °C	-30°C~+50°C
Humedad ambiente	20% ~ 95 % sin condensación	20% ~ 95 % sin condensación	20% ~ 95 % sin condensación
Ficha técnica	NO	NO	SI
Peso	181 g	106 g	230 g
Dimensiones		(8.5x6x3.3) cm (L*W*H)	
Costo	\$153	\$120	\$291 (\$40 iva)

	https://uelectronics.com/producto/fuente-conmutada-12v-3a/	https://uelectronics.com/producto/fuente-conmutada-12v-2a/	https://www.agelectro.com/detalle.php?p=A-50FAL-12
--	---	---	---

C. Implementación

C.1 Diagrama electrónico

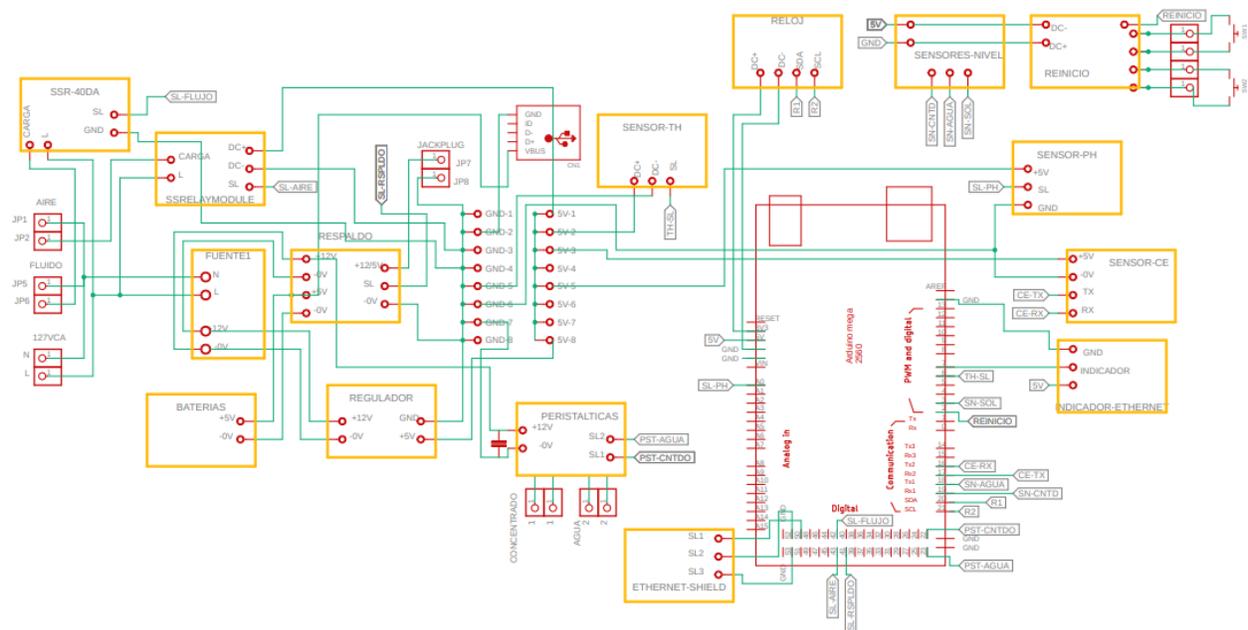


Figura 122 Diagrama electrónico

D. Diseño de PCBS

- Circuito de respaldo.

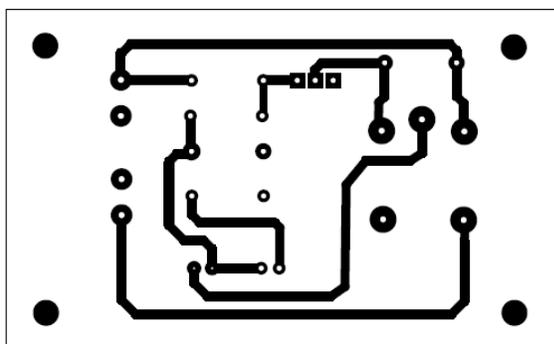


Figura 123 Capa inferior del PCB del circuito de respaldo.

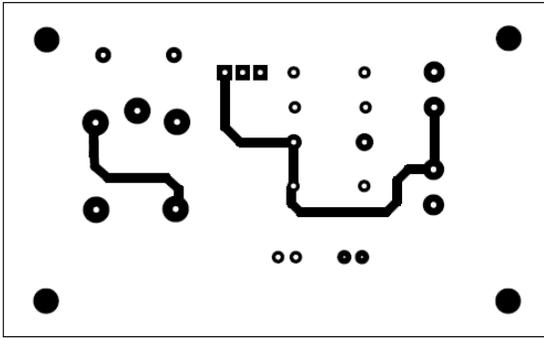


Figura 124 Capa superior en espejo del PCB del circuito de respaldo.

- Circuito para sensores de nivel.

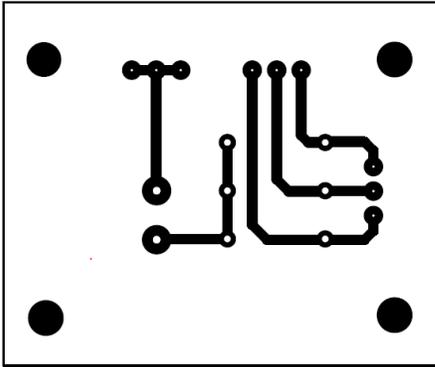


Figura 125 Capa inferior del PCB para sensores de nivel.

- Circuito para bombas peristálticas.

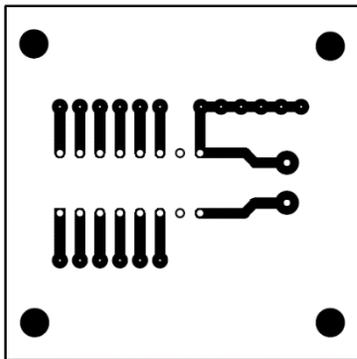


Figura 126 Capa inferior del PCB para bombas peristálticas

- Circuito para botones de reinicio.

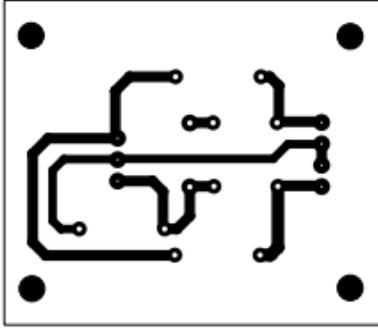


Figura 127 Capa inferior del PCB para botones de reinicio.

- Circuito para indicador error de conexión ethernet.

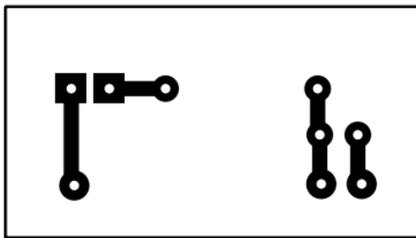
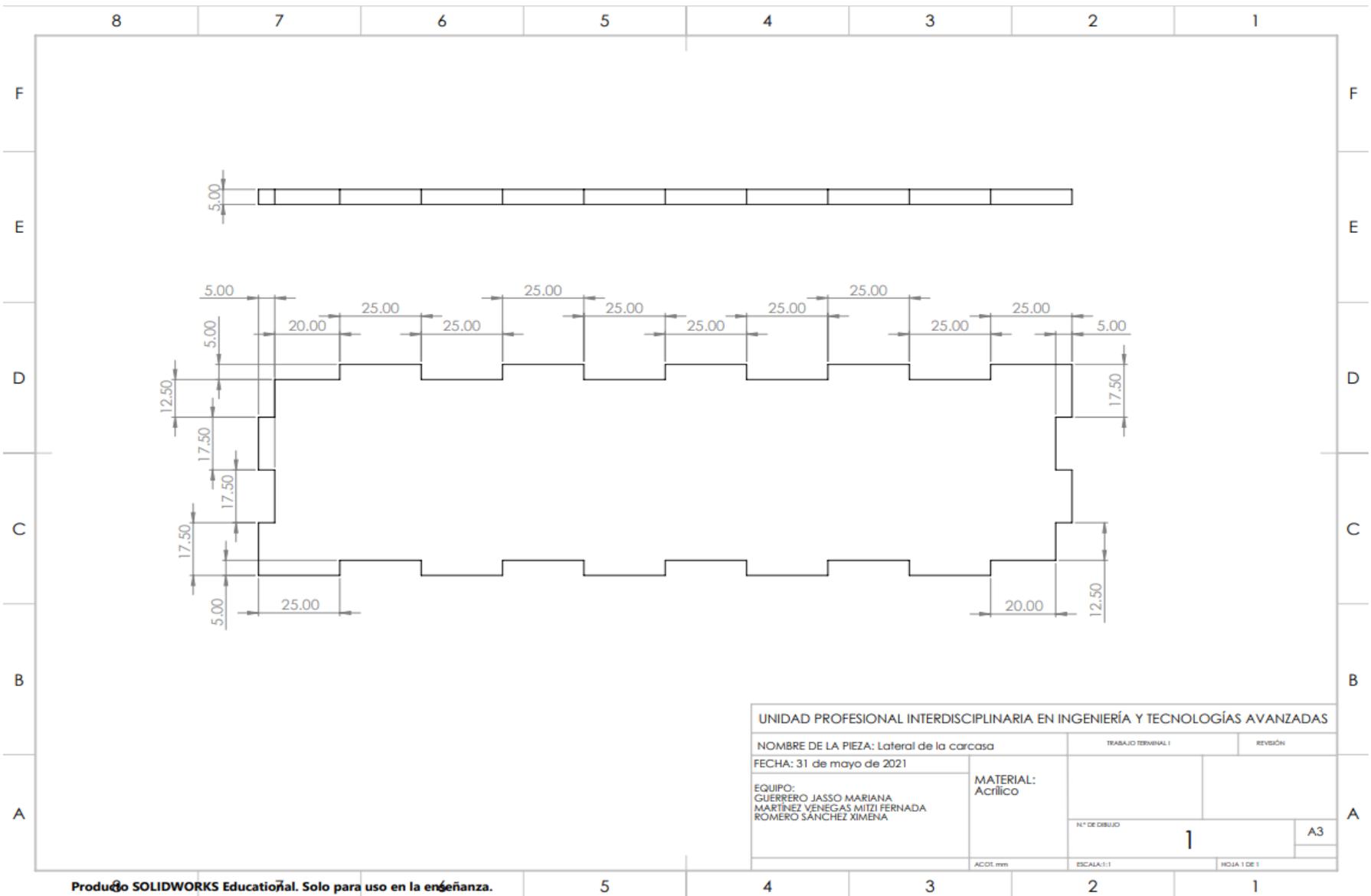


Figura 128 Capa inferior del PCB para Led indicador de error de conexión ethernet.

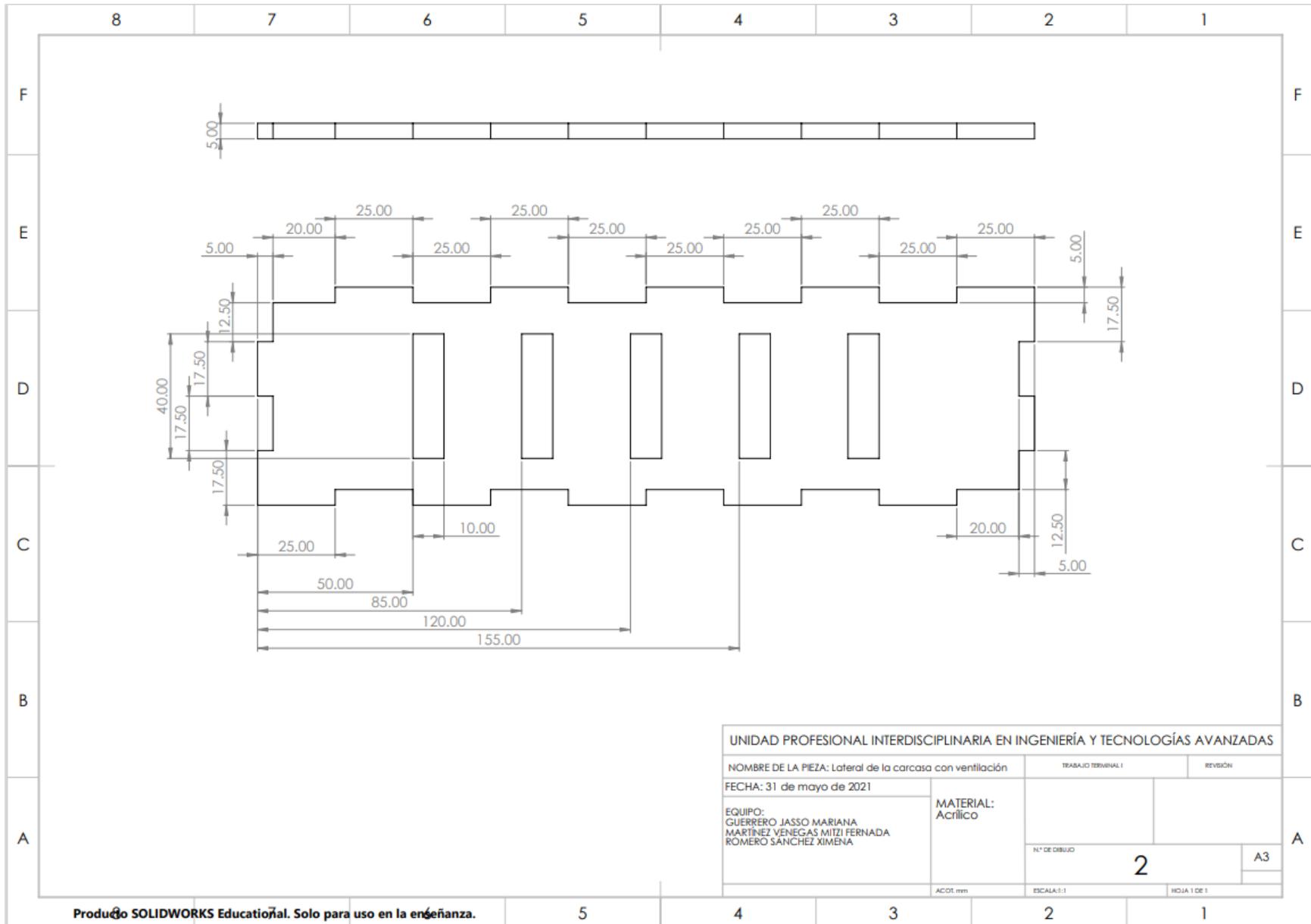
E. Planos de manufactura

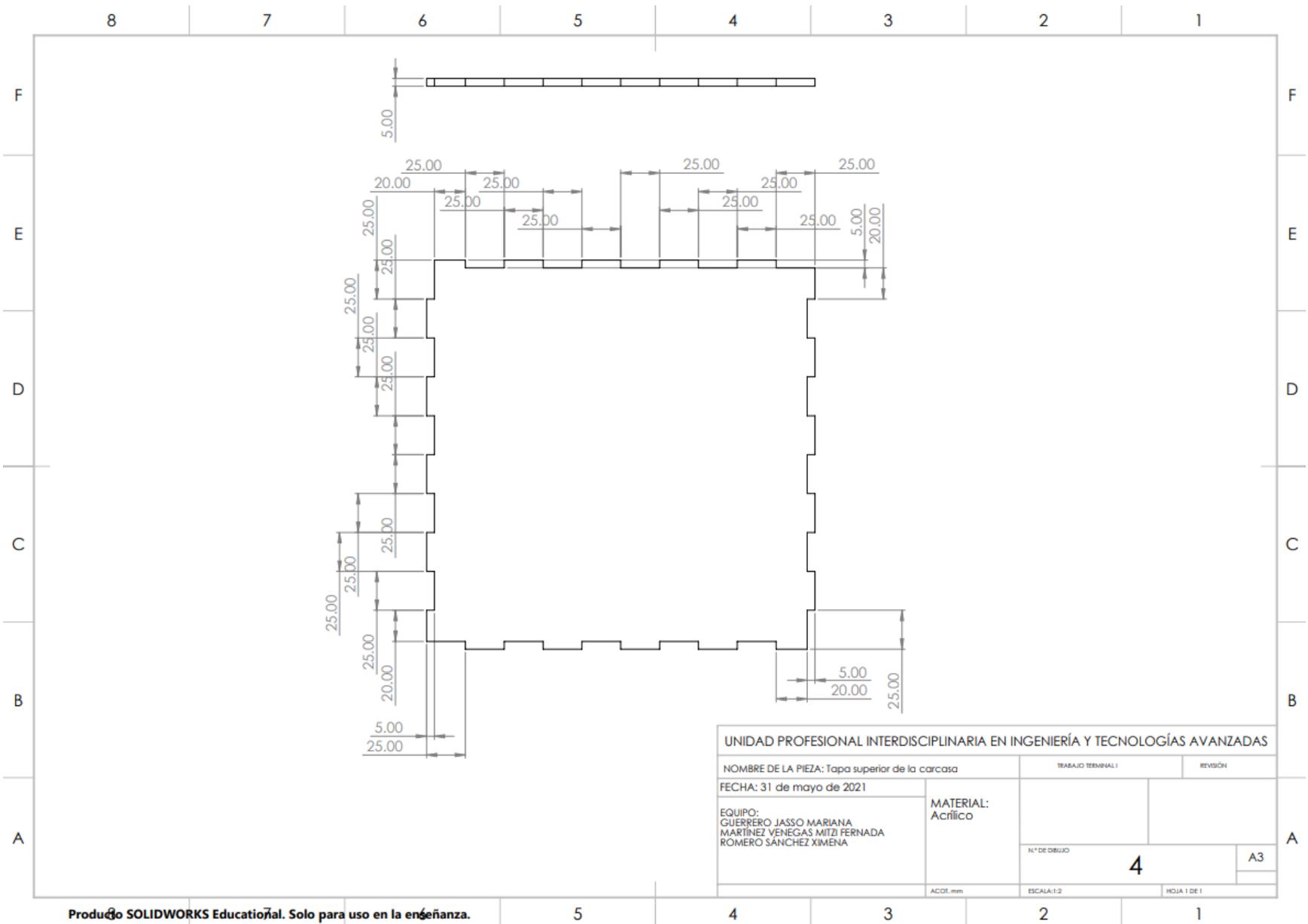
En este anexo se muestran los planos de distintos elementos que conforman parte de la integración estructural del sistema. En orden de aparición los elementos son:

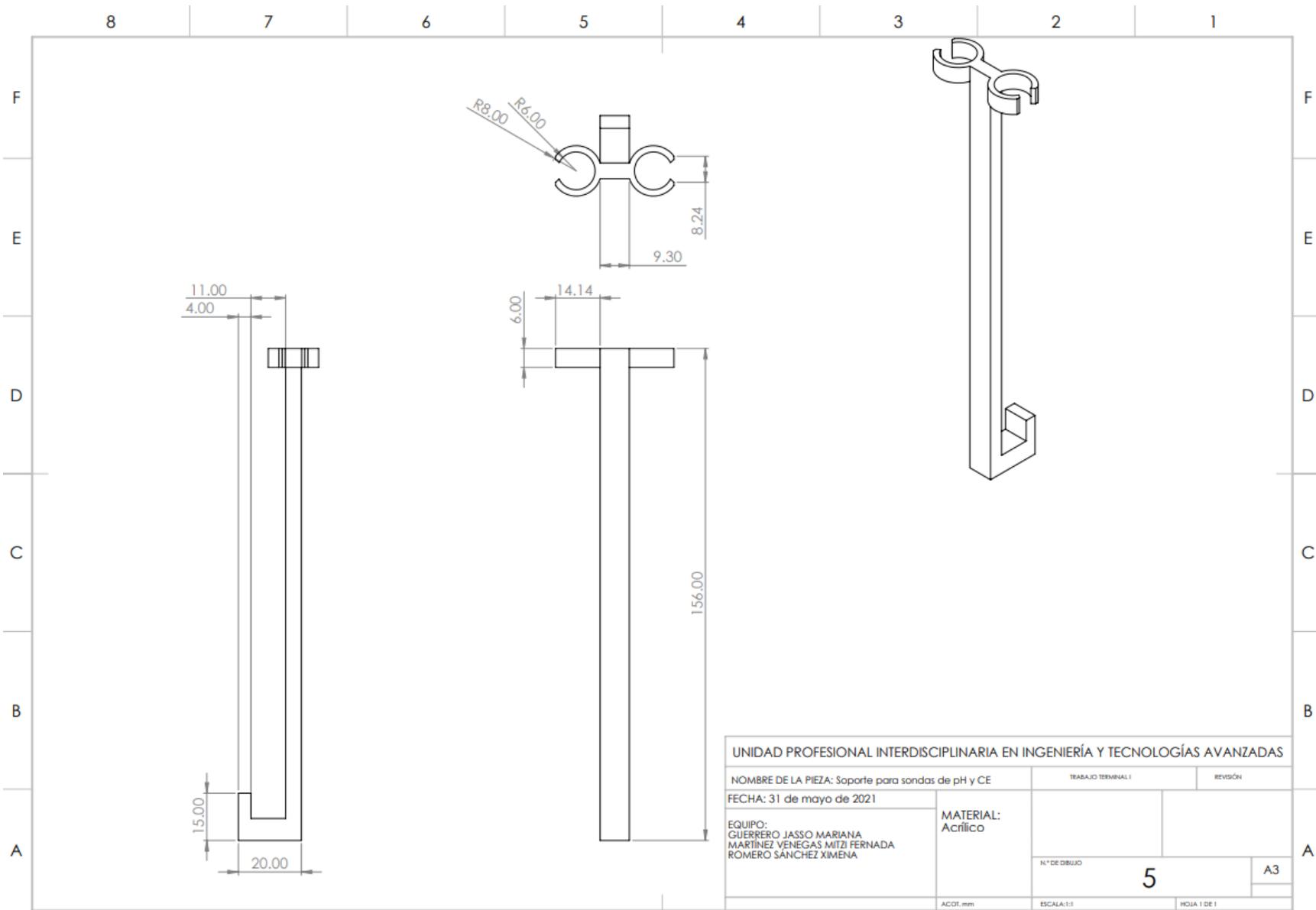
- Placa lateral de la carcasa de los componentes electrónicos
- Placa lateral de la carcasa de los componentes electrónicos con rejilla de ventilación
- Placa base de la carcasa de los componentes electrónicos
- Placa base de la carcasa de los componentes electrónicos con barrenos para su sujeción
- Soporte para las sondas de pH y CE
- Carcasa base para el sensor de humedad y temperatura
- Segunda carcasa para el sensor de humedad y temperatura



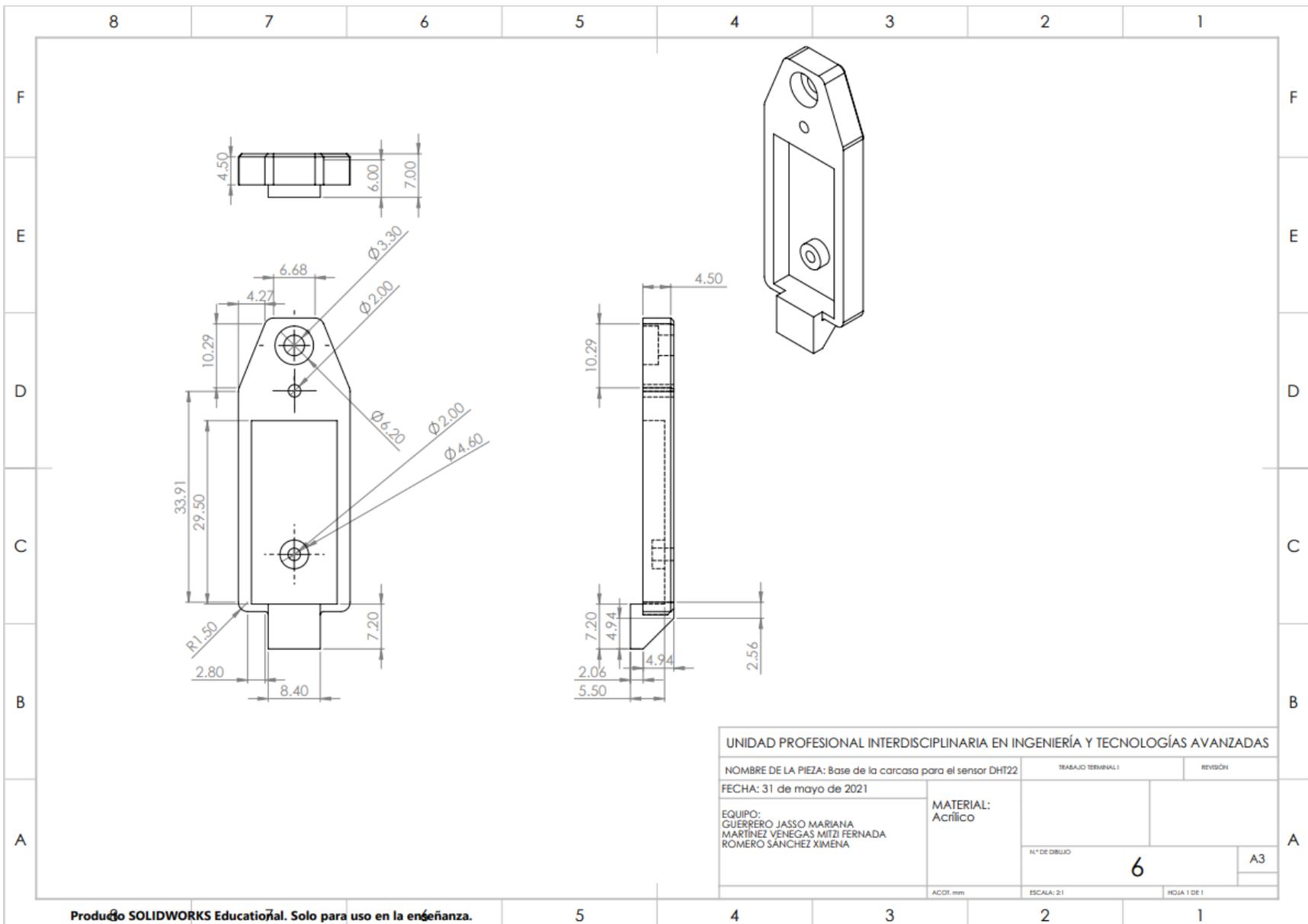
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

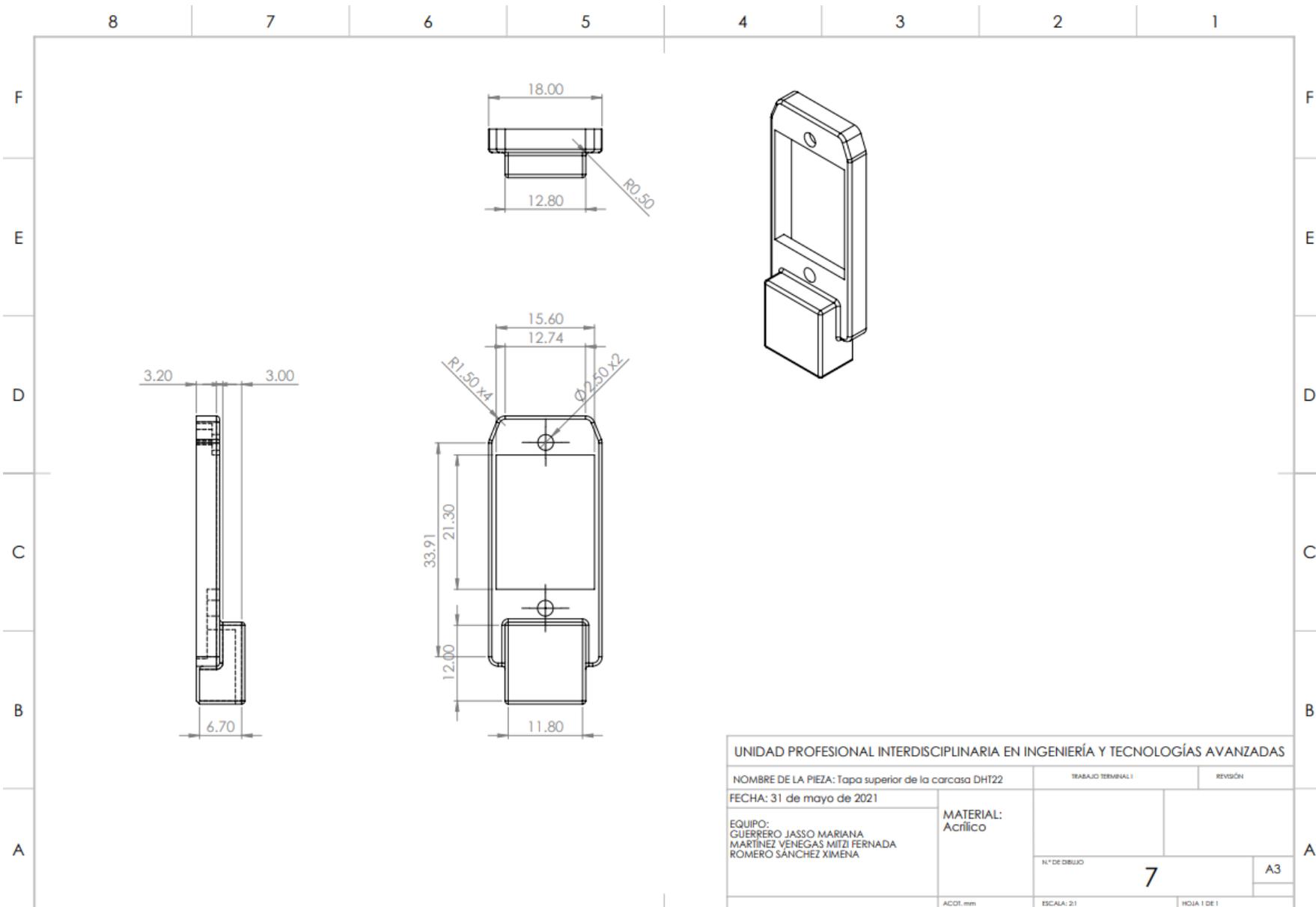






UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS			
NOMBRE DE LA PIEZA: Soporte para sondas de pH y CE		TRABAJO TERMINAL I	REVISIÓN
FECHA: 31 de mayo de 2021			
EQUIPO: GUERRERO JASSO MARIANA MARTÍNEZ VENEGAS MITZI FERNANDA ROMERO SÁNCHEZ XIMENA		MATERIAL: Acrílico	
		N° DE DIBUJO	A3
		5	
ACOT. mm		ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1





Bibliografía

- [1 B. Degenhart, «Nueva Sociedad 262,» 2016. [En línea]. Available:
] <https://biblat.unam.mx/hevila/Nuevasociedad/2016/no262/12.pdf>. [Último acceso: 17
Noviembre 2020].
- [2 SEMARNAT, «Los servicios ambientales del suelo Recuadro,» [En línea]. Available:
] https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap3_Suelos.pdf.
[Último acceso: 17 Noviembre 2020].
- [3 GroHo, «Hidroponía: una excelente alternativa para la agricultura sustentable,»
] Hidroponía España | Cultivos Hidropónicos, [En línea]. Available:
<https://www.groho.es/post/hidroponia-una-excelente-alternativa-para-la-agricultura-sustentable>. [Último acceso: 17 Noviembre 2020].
- [4 J. B. y. D. O. Gimenez, «Cultivo en hidroponía,» 2020.
]
- [5 S. P. y. V. Fuentes, «Hábitat sustentable,» Colección arquitectura y urbanismo
] internacional, 2012. [En línea]. Available:
https://issuu.com/antonio8092/docs/padilla_s._2012_h_bitat_sustent. [Último
acceso: 17 Noviembre 2020].
- [6 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, «Ciudad de
] México: Ciudades más verdes en América Latina y el Caribe,» Organización de las
Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2015. [En línea]. Available:
http://www.fao.org/ag/agp/greenercities/es/cmvalc/ciudad_de_mexico.html. [Último
acceso: 17 Noviembre 2020].
- [7 EDRSSA, «Investigación de la Producción y Consumo de Hortalizas,» CDMX, 2020.
]
- [8 A. Lara, «Manejo de solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía,»
] *Terra*, vol. 17, pp. 221-229, 1999.

- [9 H. W. T. C. A. P. C. y. S. L. N. D. S. Domingues, «Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production,» *Comput Electron Agric*, vol. 84, pp. 53-61, 2012.
- [1 E. Guerrero, «Automatización de la irrigación de un sistema hidropónico NFT,» Tesis 0] IPN, 2020.
- [1 M. C. y. L. Manuel, «Prototipo para el cultivo hidropónico de jitomate cherry utilizando 1] la técnica de película nutritiva en un invernadero,» CDMX, 2016.
- [1 A. Rafi Al Tahtawi y R. Kurniawan, «PH control for deep flow technique hydroponic 2] IoT systems based on fuzzy logic controller,» *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, vol. 8, n° 4, pp. 323-329, 2020.
- [1 N. Surantha y H. Surantha, «Smart hydroculture control system based on IoT and 3] fuzzy logic,» *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, vol. 16, n° 1, pp. 207-221, 2020.
- [1 ManualZZZ, «User manual | User`s guide - The Green Automation,» ManualZZZ, [En 4] línea]. Available: https://manualzz.com/doc/7479257/user-s-guide---the-green-automation?__cf_chl_jschl_tk__=pmd_l_teMYHNrcVDIKxNT2wCc9orHvmAVkMyk_0WpdFOsrM-1630455225-0-gqNtZGzNAhCjcnBszQil. [Último acceso: 31 Agosto 2021].
- [1 Overgrower, «Automation of hydroponics for growing OverGrower, pH-CE controller 5] greenhouse smart city-farmer,» OverGrower, [En línea]. Available: <https://overgrower.ru/en/>. [Último acceso: 23 Noviembre 2020].
- [1 ProsystemAqua, «pH&Ec Controller, dosificador automático de medición continua,» 6] ProsystemAqua, [En línea]. Available: <http://www.prosystemaqua.com/ph-ec-controller.php#>. [Último acceso: 23 Noviembre 2020].
- [1 R. V. F. B. M. d. C. O. y. J. M. R. Vázquez, «Producción Hidropónica de Nopa 7] Verdura,» *RESPYN Salud Pública y Nutrición*, vol. 5, n° 5, p. 36, 210.
- [1 R. D. y. J. Lehr, *Environmental Instrumentation and Analysis Handbook*, 2004. 8]
- [1 S. Prajapati, «Understanding Conductivity Cell Constants,» SENSOREX, [En línea]. 9] Available: <https://sensorex.com/blog/2017/11/29/conductivity-cell-constants/>. [Último acceso: 22 Marzo 2021].

- [2 METTLER TOLEDO, «A GUIDE TO pH measurement,» METTLER TOLEDO, [En 0] línea]. Available: https://www.mt.com/mt_ext_files/Editorial/Generic/1/Guides_to_Electrochemical_Analysis_0x000248ff00025c9a00093c4a_files/guideph.pdf. [Último acceso: 24 Marzo 2021].
- [2 R. L.Mott y J. A. Untener, Mecánica de Fluidos, Séptima ed., Pearson, 2015. 1]
- [2 T. J. Ross, «Fuzzy Control Systems,» de *Fuzzy Logic With Engineering Applications*, 2] Wiley, 2010, p. 585.
- [2 «Cómo Diseñar un Sistema de Inferencia Difusa de Tipo Mamdani,» Boletín UPIITA, 3] [En línea]. Available: <http://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/845-cyt-numero-75/1760-como-disenar-un-sistema-de-inferencia-difusa-de-tipo-mamdani>. [Último acceso: 2 Junio 2020].
- [2 V. D. Ingenieure, VDI 2206 - Design methodology for mechatronic systems", VDI- 4] Handbuch Konstruktion, 2004.
- [2 D. M. Short, «Lecture 4: Quality Function Deployment (QFD) and House of Quality,» 5] MIT, 2011. [En línea]. Available: <https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-033-nuclear-systems-design-project-fall-2011/videos-class-notes/lecture-4-quality-function-deployment-qfd-and-house-of-quality/>. [Último acceso: 2021].
- [2 S. M. S. N. I. y. Y. N. A. Hambali, «Application of analytical hierarchy process in the 6] design concept selection of automotive composite bumper beam during the conceptual design stage,» de *Scientific Research and Essay*, vol. 4, no. 4, 2009, pp. 198-211.
- [2 M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Oxford: 4th ed. , 2011. 7]
- [2 J. E. Akin, Finite Element Analysis Concepts via Solidworks, Houston, Texas, 2009. 8]
- [2 G. Mirlisenna, «ESSS,» 22 enero 2016. [En línea]. Available: 9] <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>. [Último acceso: 17 abril 2021].

[3 R. V. Petrova, Introduction to Static Analysis Using SolidWorks Simulation, Boca 0] Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2015.

[3 SEISMOUS, «Análisis por elemento finito: qué es y cómo funciona,» 14 Noviembre 1] 2019. [En línea]. Available: <https://seismous.com/analisis-por-elemento-finito-que-es-y-como-funciona/>. [Último acceso: 17 Abril 2021].

[3 J. M. Pereiras, «¿Qué es y para qué sirve la tensión de von Mises?,» LinkedIn, 7 2] Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-es-y-para-sirve-la-tensi%C3%B3n-de-von-mises-jose-manuel-pereiras>. [Último acceso: 17 Abril 2021].

[3 SCALA, «Concepto de esfuerzo,» [En línea]. Available: 3] <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r145r/w1397w/U1liga1.htm>. [Último acceso: 17 Abril 2021].

[3 I. L. E. S. G. Ing. Cristian Danilo León Useche, «Análisis estático de sistema de fijación 4] para asegurar centro en entornos cilíndricos,» Grupo de Investigación GIDAM , Nueva Granada, España, 2015.

[3 INEGI, «Clima. Distrito Federal,» INEGI, [En línea]. Available: 5] <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema> . [Último acceso: 28 03 2021].

[3 M. Zárate, «Manual de hidroponia,» 2014. [En línea]. Available: 6] https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual_de_hidroponia.pdf. [Último acceso: 17 Noviembre 2020].

[3 R. H. Bishop, Mechatronics: An introduction, Taylor & Francis, 2006. 7]

[3 F. PUBS, Announcing the standard for integration definition for function modeling 8] (IDEF0), Processing Standards Publication, 1993.

[3 C. H. Environment. [En línea]. Available: 9] https://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=51. [Último acceso: 27 Abril 2021].

[4 L. Brenes Peralta, . M. F. Jiménez Morales, F. Gómez Coto y G. Álvaro Guevara, 0] «repositoriotec,» Junio 2014. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3371/modelo-manejo-sistema->

producci%C3%B3n-hortalizas.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 18 Marzo 2021].

[4 T. Baras, DIY Hydroponic Gardens-How to design and build an inexpensive system 1] for growing plants in water, Quarto knows, 2018.

[4 «Vegetales hidropónicos Veggitso,» [En línea]. Available: <https://www.veggitso.com/>. 2] [Último acceso: 24 Abril 2021].

[4 Eroski Consumer, «Hortalizas y verduras,» [En línea]. Available: 3] <https://verduras.consumer.es/lechuga/introduccion>. [Último acceso: 08 Abril 2021].

[4 J. MAGÁN CAÑADAS, «InfoAgro- RECIRCULACIÓN DE LAS SOLUCIONES 4] NUTRITIVAS. MANEJO Y CONTROL MICROBIOLÓGICO (1ª parte),» [En línea]. Available: https://infoagro.com/abonos/docs/recirculacion_nutritiva.htm. [Último acceso: 28 Marzo 2021].

[4 G. Carrasco y J. Izquierdo, Manual Técnico- La empresa hidroponica de mediana 5] escala: La técnica de la solución nutritiva ("NFT"), Universidad de Talca, 1996.

[4 A. Roca Fernández, «AgroInfo,» [En línea]. Available: 6] https://www.infoagro.com/documentos/macro___micronutrientes_y_metales_pesados_presentes_suelo.asp. [Último acceso: 29 Abril 2021].

[4 J. Martínez, Tocatl- Introducción a la Hidroponía. 7]

[4 Y. D. O.-H. y. R. L.-P. Gabino A. Martínez-Gutiérrez, «Oxigenación de la solución 8] nutritiva recirculante y su efecto en tomate y lechuga,» Chapingo, Septiembre 2012. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000500010. [Último acceso: Mayo 2021].

[4 I. A. J. L. Castañares, «ABC DE LA HIDROPONIA,» [En línea]. Available: 9] https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_amba_-_abc_de_la_hidroponia.pdf. [Último acceso: Mayo 2021].

[5 GroHo, «Consejos para iniciar su sistema de Hidroponia,» [En línea]. Available: 0] <https://www.groho.es/post/consejos-para-iniciar-su-sistema-de-hidroponia>. [Último acceso: Mayo 2021].

[5 J. J. Benton Jones, Complete Guide for Growing Plants Hydroponically, CRC Press, 1] 2014.

[5 Anixter, «Comparando protocolos de comunicación inalámbrica,» 2018. [En línea].
2] Available: https://www.anixter.com/es_la/resources/literature/techbriefs/comparing-wireless-communication-protocols.html. [Último acceso: 20 Abril 2021].

[5 Atlas Scientific, «Analog pH Sensor/meter,» 12 2020. [En línea]. Available:
3] <https://atlas-scientific.com/files/Gravity-pH-datasheet.pdf>. [Último acceso: Mayo 2021].

[5 «Espressif Systems,» 2021. [En línea]. Available:
4] https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [Último acceso: 1 Junio 2021].

[5 C. Platt, «AC-DC Power Supply,» de *Encyclopedia of Electronic Components Volume 5* 1, O'REILLY, 2013, p. 300.

[5 T. Jokela, N. Livari y M. Virkkula , «Research Gate,» Enero 2003. [En línea]. Available:
6] https://www.researchgate.net/profile/Timo-Jokela/publication/234788597_The_standard_of_user-centered_design_and_the_standard_definition_of_usability_Analyzing_ISO_13407_against_ISO_9241-11/links/5720517808aefa64889a927e/The-standard-of-user-centered-design. [Último acceso: 15 Mayo 2021].

[5 IDEO, The field guide to human-centered design, 2015.
7]

[5 J. Díaz, I. Harari y A. P. Amadeo, Guía de recomendaciones para diseño de software
8] centrado en el usuario, Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata, 2013.

[5 F. Jean Yves, Human-Machine Interface Design for Process Control Applications,
9] International Society of Automation, 2009.

[6 A. I. Rangel Elizalde, «Estudio antropométrico de la población mexicana masculina
0] laboralmente productiva,» *Cinetífica*, vol. 19, nº 1, pp. 11-15, 20 Mayo 2015.

[6 P. L. L. G. M. E. Ávila Chaurand Rosalio, «Research Gate,» Universidad de
1] Guadalajara, Enero 2007. [En línea]. Available:
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14486/2018sergioboh%C3%B3rquez4.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. [Último acceso: 14 Mayor 2021].

- [6 Atlas Scientific, «MakerBot Thingiverse,» 22 Agosto 2014. [En línea]. Available: 2] <https://www.thingiverse.com/thing:437623>. [Último acceso: 29 Mayo 2021].
- [6 L. L. y. R. Felipe, «Diagramas de flujo,» de *Lógica para computación* , AlfaOmega, p. 3] 244.
- [6 «Arduino-HTTPRequest,» [En línea]. Available: 4] <https://arduinogetstarted.com/tutorials/arduino-http-request>. [Último acceso: 26 Octubre 2021].
- [6 J. Roca, «¿Que son los puertos de E/S de baja velocidad? I2C, SPI y UART,» Hard 5] Zone, 9 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://hardzone.es/reportajes/ques/i2c-spi-uart/>. [Último acceso: 22 Abril 2021].
- [6 D. R. Estrada-Marmolejo, «Puerto Serial – protocolo y su teoría,» HetPro, [En línea]. 6] Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/puerto-serial/#:~:text=Un%20puerto%20Serial%20es%20un,%2Dduplex%2C%20Duplex%20y%20Simplex>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [6 Instituto Tecnológico de Querétaro, «Comunicaciones Digitales: Protocolos seriales 7] (uC),» [En línea]. Available: http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos_contenido/Apuntes%20de%20materias/ETD1022_Microcontroladores/4_SerialCom.pdf. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [6 T BEM, «Fundamentos I2C,» 4 Febrero 2017. [En línea]. Available: 8] [https://teslabem.com/nivel-intermedio/fundamentos/#:~:text=I2C%20significa%20Circuito%20Interintegrado%20\(Por,tiempo%20dentro%20de%20los%20televisores](https://teslabem.com/nivel-intermedio/fundamentos/#:~:text=I2C%20significa%20Circuito%20Interintegrado%20(Por,tiempo%20dentro%20de%20los%20televisores). [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [6 SeeedStudio, «UART vs I2C vs SPI – Communication Protocols and Uses,» 2019. 9] [En línea]. Available: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication-protocols-and-uses/>. [Último acceso: 22 Abril 2021].
- [7 Universidad Veracruzana, «CCNA routing y switching,» 2019. [En línea]. Available: 0] https://www.uv.mx/personal/angelperez/files/2019/02/CCNA_ITN_Ch3.pdf. [Último acceso: 20 Abril 2021].
- [7 R. A. C. C. y. A. Y. Neri, «Control automático de pH basado en lógica difusa en la 1] etapa de mezclado de un proceso de elaboración de detergente líquido,» ESIME, CDMX, 2012.

